



**UNIVERSITY
OF OULU**

TIETO- JA SÄHKÖTEKNIIKAN TIEDEKUNTA

**Kari-Pekka Ahola
Markus Komulainen
Ville Nättinen**

**IHMISMÄISEN ROBOTIN PÄÄN, SILMIEN JA
SUUN LIIKKEIDEN KEHITTÄMINEN**

Kandidaatintyö
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma
Kesäkuu 2023

Ahola K., Komulainen M., Nättinen V. (2023) Ihmismäisen robotin pään, silmien ja suun liikkeiden kehittäminen. Oulun yliopisto, Tietotekniikan tutkinto-ohjelma, 53 s.

TIIVISTELMÄ

Perinteisesti robotit ovat olleet tärkeässä roolissa muun muassa tehdastyön tehokkuuden kasvattamisessa, mutta viime vuosina robotiikan huomio on keskittynyt yhä enemmän ihmistä muistuttaviin robotteihin eli humanoidirobotteihin, joita voitaisiin käyttää useissa tehtävissä ihmisten korvikkeena. Ihmisen muoto kuitenkin aiheuttaa useita haasteita robotin suunnittelussa, suurimpien joukossa luonnollisilta vaikuttavien liikkeiden toteuttaminen.

InMoov-robotin päälle toteutettiin ohjausjärjestelmä, joka parantaa aiemmin toteutettua kasvojen seuraamista yhdistämällä siihen pään liikkeet, ja lisää puhesynteesin perusteella liikkuvan leuan sekä erinäisiä pään eleitä ihmisen ja robotin vuorovaikutuksen parantamiseksi. Järjestelmän suoriutumista testattiin käyttötarkoituksen mukaisessa ympäristössä kahdella erillisellä kerralla, joissa ilmi tulleita havaintoja käytettiin järjestelmän parantamiseen.

Lopullinen järjestelmä pystyy kääntämään robotin silmiä sekä päätä ihmismäisesti kohti tunnistettuja kasvoja ja suorittamaan valmiiksi ohjelmoituja pään eleitä, minkä lisäksi siinä on valmius yhdistää leuka liikkumaan ulkoisen ohjelmiston puheen mukaan. Robotin kokoonpano koostuu päästä, kaulasta, torsosta ja olkavarsista.

Avainsanat: robotiikka, outo laakso, ihmisen ja robotin vuorovaikutus, InMoov

Ahola K., Komulainen M., Nättinen V. (2023) Developing Head, Eye, and Jaw Movements of a Humanoid Robot. University of Oulu, Degree Programme in Computer Science and Engineering, 53 p.

ABSTRACT

Traditionally robots have had an important role in making factories more efficient, among other things, but in recent years the field of robotics has been more and more focused on robots that resemble humans, also known as humanoid robots, which could be used in many tasks as replacements for human workers. However, designing such robots poses many challenges, one of the greatest being the difficulty of creating human-like movements.

In this work, a control system for the head of an InMoov robot, which improves on its previously implemented face tracking capabilities by adding head movement and implements speech synthesis-based jaw movements along with various head gestures in order to improve human-robot interaction with the robot, was implemented. The system was tested in its intended environment on two separate occasions in order to observe where the system could be improved further.

The final system is able to turn the robot's eyes and head towards detected faces in a human-like fashion and execute pre-programmed head gestures, in addition to which it has the capability to move its jaw according to speech synthesised in an external program . The robot consists of a head, a neck, a torso, and upper arms.

Keywords: robotics, uncanny valley, human-robot interaction, InMoov

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	
ABSTRACT	
SISÄLLYSLUETTELO	
ALKULAUSE	
LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET	
1. JOHDANTO	7
2. IHMISMÄISTEN PÄIDEN LIIKKEET	8
2.1. Outo laakso	8
2.2. Ihmisen ja robotin välinen vuorovaikutus ja sen haasteet	10
2.3. Pään, silmien ja suun liikkeet ihmisillä	12
2.3.1. Silmien liikkeet	12
2.3.2. Pään liikkeet	12
2.3.3. Suun liikkeet puhuessa	13
2.4. Pään, silmien ja suun liikkeet robotiikassa	14
2.4.1. Pään liikuttaminen	15
2.4.2. Silmien liikuttaminen	15
2.4.3. Suun liikuttaminen	17
3. TOTEUTUS JA TESTAUS	18
3.1. Alkuperäinen toteutus	18
3.1.1. InMoov-robotti	18
3.1.2. Robot Operating System	19
3.1.3. Suun liikkeen synkronointi puhesynteesin kanssa	19
3.1.4. Pään liikuttaminen kasvojen seuraamisen parantamiseksi	21
3.1.5. Pään eleet	24
3.2. Testauksen asettelu	24
3.2.1. Testaustilanne	25
3.2.2. Kysely	26
3.3. Ensimmäinen testauskerta	26
3.3.1. Ensimmäisen testauskerran aikana esiin nousseet havainnot	27
3.3.2. Kyselyn tulokset ensimmäisellä testauskerralla	28
3.3.3. Robottiin tehdyt muutokset ensimmäisen testauskerran pohjalta	29
3.3.4. Kyselyyn tehdyt muutokset ensimmäisen testauskerran pohjalta	30
3.4. Toinen testauskerta	31
3.4.1. Toisen testauskerran aikana esiin nousseet havainnot	32
3.4.2. Kyselyn tulokset toisella testauskerralla	33
3.4.3. Robottiin tehdyt muutokset toisen testauskerran pohjalta	34
4. POHDINTA	35
5. JATKOKEHITYS	37
6. AJANKÄYTTÖ	39
7. YHTEENVETO	40
8. VIITTEET	41
9. LIITTEET	46

ALKULAUSE

Tämä työ tehtiin osana Oulun yliopiston Sulautettujen ohjelmistojen projekti-kurssia. Kiitämme Teemu Tokolaa työn ohjaamisesta sekä Aapo Pihlajaniemeä käytännön avusta.

Oulussa 8. kesäkuuta 2023

Kari-Pekka Ahola
Markus Komulainen
Ville Nättinen

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

HOG	Histogram of Oriented Gradients
SVM	Support Vector Machine
MFCC	Mel-Frequency Cepstral Coefficient
ROS	Robot Operating System
IPA	International Phonetic Alphabet – Kansainvälinen foneettinen aakkosto
RNN	Recurrent Neural Network – Takaisinkytketty neuroverkko

1. JOHDANTO

Robotteja on jo vuosikymmeniä käytetty muun muassa teollisuudessa korvaamaan ihmistyöntekijöitä yksinkertaisissa sekä toistuvissa töissä, kuten tehtaissa kokoamaan laitteita niiden komponenteista. Nämä teolliset robotit ovat tärkeässä roolissa etenkin tehtävissä, jotka voivat usein olla vaarallisia ihmistyöntekijälle. Ensimmäisenä teollisena robottina pidetty Unimate-robottikäsi otettiin juuri tämän takia käyttöön General Motorsin autotehtaalla vuonna 1961. Unimaten tehtävänä oli upottaa vasta valettuja auton osia jäähdytysnesteeseen, mistä osat jatkoivat jäähdyttyään jatkokäsittelyyn. Kuumen metallin käsittely sekä jäähdytysnesteestä tulevat höyryt tekivät tehtävästä ihmiselle vaarallisen, mutta teräksestä valmistetulle robotille tästä ei aiheutunut vaivaa. [1, 2]

Teknologian kehittyessä roboteista on tullut monipuolisempia sekä halvempia valmistaa, mikä on johtanut viihde- sekä kuluttajakäyttöön suunniteltujen robottien nousuun. Esimerkkinä ensimmäisen kerran vuonna 1998 julkaistu LEGO Mindstorms-robotisarja, joka mahdollistaa harrastekäyttöisten robottien helpon suunnittelun sekä valmistamisen ilman aikaisempaa kokemusta ohjelmoinnista [3]. Mindstormsin kaltaiset tuotteet auttavat luomaan innostusta sekä parantamaan kuluttajien ymmärrystä roboteista, mikä puolestaan avustaa robotiikan alan tulevaa kehitystä. [2]

Viime aikoina kuitenkin on alettu suunnittelemaan kaupalliseen käyttöön tarkoitettuja ihmisiä muistuttavia robotteja, joita voidaan käyttää esimerkiksi apuna vanhainkodeissa tai asiakaspalvelutehtävissä.

Yksi suurimmista ongelmista ihmismäisen robotin suunnittelemisessa on tarpeeksi ihmismäisen ulkonäön sekä liikkeiden toteuttaminen. Jos nämä eivät saavuta riittävää tasoa, robotin ihmismäiset ominaisuudet voivat aiheuttaa enemmän haittaa kuin hyötyä vuorovaikutuksessa ihmisten kanssa. [4]

Pään ja kasvojen liikkeillä on suuri vaikutus robotin ihmismäisyyteen. Vaikka pää näyttäisi täysin ihmismäiseltä, jäykät suun liikkeet tai epäluonnolliset silmien liikkeet voivat tehdä robotin kanssa vuorovaikuttamisesta epämiellyttävää [5].

Kasvojen liikkeet ovat myös auttavassa roolissa robotin puhuessa. Katsekontakti voi oikeassa tilanteessa kasvattaa luottamuksen tunteita robottia kohtaan [6] ja laadukkailla suun liikkeillä voidaan parantaa puheen [7] sekä tunteiden [8] tunnistettavuutta.

Teknisesti toimivan ja ihmisten kanssa hyvin toimeentulevan humanoidirobotin toteuttamiseksi on tärkeää testata robottia kehityksen aikana ihmisten parissa ja saada siitä palautetta. Näin ongelmakohtiin voidaan puuttua mahdollisimman varhaisessa vaiheessa ja vain vuorovaikutusta arvioimalla voidaan robotista luoda mahdollisimman vuorovaikutuskykyinen.

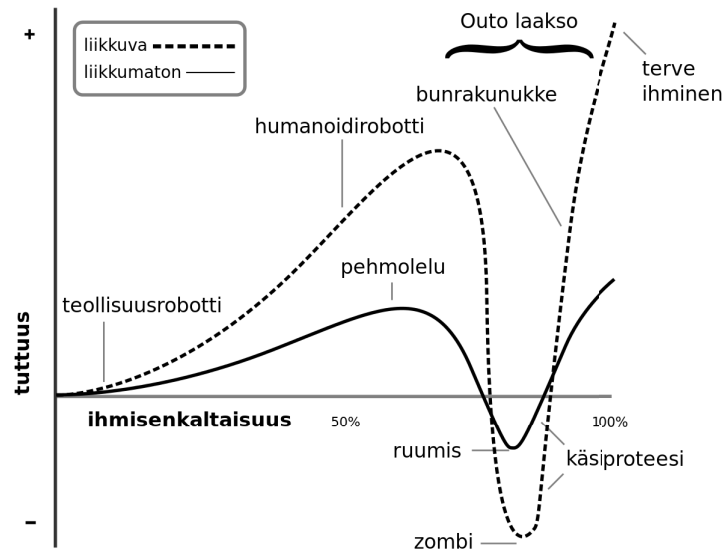
2. IHMISMÄISTEN PÄIDEN LIIKKEET

Ihmismäisten robottien suunnittelussa on tärkeää pyrkiä siihen, että robotin pään, silmien sekä suun liikkeet eivät osu ihmismäisyydeltään outoon laaksoon. Silmien liikkeissä voi usein käyttää yksinkertaisia mekanismeja hyvinkin aitojen liikkeiden toteuttamiseen, mutta muun muassa suuta toteuttaessa mekanismien täytyy olla monimutkaisempia ihmismäisten huulien sekä leuan liikkeiden saavuttamiseksi. Myös pään sekä kaulan liikuttamisessa voidaan käyttää esimerkiksi tekolihasia, joilla voidaan matkia oikean ihmispään lihasten asetelua ja tätä kautta liikeratoja.

2.1. Outo laakso

Ihmisen ja robotin vuorovaikutukseen keskittyvän tutkimuksen keskiössä ovat olleet ihmisen tuntemukset ja kokemukset, joita on usein tarkasteltu *outo laakso* -teoriaan (engl. uncanny valley) peilaten. Paljon huomiota saaneen teorian mukaan ihmistä tai ihmisen osaa muistuttava objekti, kuten robotti, koetaan erityisen *karmivana* (engl. uncanny/erie), kun sen ulkonäkö alkaa liiaksi muistuttamaan ihmistä, kuitenkin pääsemättä täysin ihmisen tasolle. Robotiikassa tämä aiheuttaa haasteita etenkin silloin, kun pyritään luomaan ihmismäisiä humanoidirobotteja, joiden tarkoituksena on kyetä toimimaan luontevasti ihmisten parissa. Tällöin avainasemaan nouseekin outo laakso -ilmiön tarkempi tarkastelu ja arviointi.

Professori Masahiro Morin vuonna 1970 julkaiseman outo laakso -teorian mukaan ihmisten reaktiot eivät muutu neutraalista lineaarisesti positiivisemmiksi, kun objekti lähestyy piirteiltään ihmistä. Sen sijaan suhtautuminen ihmistä tai ihmisen osaa muistuttavaan objektiin taittuukin äkillisesti negatiiviseksi huipuksi sen lähestyessä ulkoisilta ominaisuuksiltaan ihmistä, ennen kuin suhtautuminen kääntyy takaisin positiiviseksi objektin saavuttaessa tarpeeksi ihmismäisen olemuksen (Kuva 1). Tämä notkahdus vastaanottavuudessa liian – mutta ei tarpeeksi – ihmismäisen objektin kohdalla voidaan kuvata eräänlaisena laaksona, mistä teoria on saanut nimensä. [4]



Kuva 1. Suomennettu versio Morin esittämästä kuvaajasta outo laakso -ilmiölle¹

Morin mukaan liike voimistaa sekä positiivista että negatiivista reaktiota entisestään [4], mutta tälle oletukselle ei kuitenkaan ole löydetty vahvaa tukea, vaan tulokset ovat olleet ristiriitaisia – jopa päinvastaisia [9]. On tosin havaittu, että esimerkiksi robotti, joka ilmentää kykyä *tuntea* tai *kokea* (engl. feel/experience) koetaan erityisen karmivana, jopa karmivampana kuin toimintansa kautta kykyä itsenäiseen päätöksentekoon osoittava robotti, joka sekin koetaan yksinkertaista tiettyyn tehtävään tarkoitettua robottia karmivampana [10, 11]. Onkin esitetty, että viitteet ihmisenkaltaiseen mieleen robotissa olisivat pääsyy negatiiviseen reaktioon, eikä ulkonäkö tai liike olisikaan keskiössä [10].

Alkuperäisessä outo laakso -teoriassa objekteja arvioidaan sen mukaan, kuinka paljon ne ulkoisilta ominaisuuksiltaan muistuttavat ihmistä [4], mutta tutkimuksiin osallistuneet ovat kuitenkin kuvanneet robotteja yhtä aikaa vain vähän ihmistä muistuttaviksi ja vain vähän mekaanisiksi [12], mikä ei sovi alkuperäiseen kuvaajaan. Tämä, yhdessä liikkeen merkityksen kyseenalaisuuden kanssa, viittaisi siihen, että Morin alkuperäinen kuvaaja ei välttämättä vastaakaan todellisuutta, tai on liiaksi yksinkertaistettu versio siitä, ja vaatisi moniulotteisemman kuvaajan [11, 12, 13]. Myös selkeän määritelmän löytämistä rajalle, jolloin objekti on liian, mutta ei täysin ihmismäinen, on pidetty haastavana, osittain siksi, että Mori itse jätti määritelmän laveaksi [9, 13] ja ihmistenkin olemukset eroavat huomattavasti toisistaan [13].

Bartneckin ym. Godspeed-kysely on luotu pyrkimyksenä yhdenmukaistaa robottien ihmismäisyyden ja miellyttävyyden mittaamista. Kysely on pohjattu havaintoihin, teorioihin ja kokemuksiin sekä robotiikan että psykologian aloilta. Kyselyssä pyritään mittaamaan robotin piirteitä kysymyksillä, jotka erittelevät esimerkiksi robotin ihmisenkaltaisuutta, mekaanisuutta, luonnollisuutta ja välittyvää älykkyyttä, jotta voitaisiin mitata kyseisiä piirteitä ja ymmärtää Morin alkuperäistä kuvaajaa laajemmin. Kyselyn viisi pääkategoriaa ovat *ihmisenkaltaisuus* (engl. anthropomorphism),

¹Kuvan luonut I, Pafcu, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2529133>

eloisuus (engl. animacy), *pidettävyys* (engl. likeability), *älykkyys* (engl. intelligence) ja *koettu turvallisuus* (engl. perceived safety). [14]

Outo laakso -ilmiön osalta tehtyjen tutkimusten tulokset ovat olleet ristiriitaisia ja epäselviä, ja tarkempi arviointi on osoittanut, että ilmiö saattaa esiintyä vain spesifisissä olosuhteissa. Myös ihmismäisyyden määrittäminen on aiheen subjektiivisen luonteen vuoksi haastavaa, vaikka objektiivisia ja yleiskäyttöisiä mittareita onkin pyritty luomaan. Tästä huolimatta ihmiset voivat kokea hyvin ihmismäiset robotit karmivina, ainakin tietyissä olosuhteissa, joten outo laakso -teoriaa ei tulisi sivuuttaa, vaan ilmiötä on syytä tarkastella Morin alkuperäisestä teoriasta irrotettuna, jotta sitä voitaisiin ymmärtää paremmin. Keinoja tähän ovat esimerkiksi moniulotteisempien mittareiden kehittäminen, jolloin esimerkiksi vähän ihmisenkaltaiset ja yhtä aikaa vähän mekaaniset robotit voidaan sijoittaa kuvaajalle, sekä ihmismäisyyden mittaamisen muuttaminen objektiivisemmaksi prosessiksi, esimerkiksi kyselyiden avulla.

2.2. Ihmisen ja robotin välinen vuorovaikutus ja sen haasteet

Tutkimus ihmisten suhtautumisesta ihmisenkaltaisten robottien ominaisuuksiin ohjaa vuorovaikutuksessa olevien robottien suunnittelua. Mahdollisimman sujuvan kanssakäymisen varmistamiseksi on ymmärrettävä robottien ja ihmisten kanssakäymisen kipukohdat ja pyrittävä löytämään ratkaisuja niihin. Tärkeitä ovat myös ihmisten omien taustojen vaikutukset heidän asenteisiinsa robotteja kohtaan, sekä niiden huomioiminen robottien kehittämisessä.

Humanoidirobottien kehityksessä selkeän haasteen aiheuttaa ilmiö, jossa liikaa ihmistä muistuttavat robotit saavat katsojassa aikaan negatiivisen reaktion. Mahdollisimman lähestyttävän robotin kehityksessä voikin olla aiheellista arvioida, onko mahdollisimman ihmismäisen robotin kehittäminen tarkoituksenmukaista, tai edes resurssien puitteissa mahdollista.

Muun muassa outo laakso -ilmiön innoittamana on robotiikan saralla pyritty löytämään ratkaisuja, jotta robotin ulkoiset ominaisuudet mielletäisiin positiivisiksi [12]. Syy liian ihmismäisen robotin aikaansaamaan karmivuuden tunteeseen saattaa johtua kyvystämme erottaa poikkeavuuksia muissa ihmisissä, jolloin juuri pienet epäkohdat kiinnittävät huomionme vahvasti, kun taas selkeästi mekaanisen robotin kohdalla tätä vertailua ihmiseen ei tapahdu [15]. Tästä johtuen outo laakso -ilmiön ensimmäinen huippu, jolloin robotti koetaan vielä helposti lähestyttävänä, voisikin olla parempi tavoite, kuin täysin ihmisenkaltaisen robotin luominen [4, 15].

Pelkkä ulkomuoto ei kuitenkaan yksin määritä ihmisen suhtautumista robottiin, vaan kehityksessä on otettava huomioon myös robotin toiminnan, kuten eleiden ja katseen, kautta välittyvä kuva robotista [10]. Robotin tarkoituksenmukaisen pään liikkeen on havaittu tuottavan katsojalle positiivisemmän suhtautumisen robottiin [16, 17, 18]. Eräässä tutkimuksessa kuitenkin robotin jäljitellessä vahvasti ihmismäisiä pään liikkeitä alkoi suhtautuminen jälleen kääntymään laskuun. Parhaat tulokset saatiinkin, kun robotti aktiivisesti vältteli katsojan katsetta kääntämällä päätään pois päin. Positiivisen reaktion takana voi kuitenkin olla mielikuva siitä, että robotti olisi ollut leikkisä ja harrastanut ihmisosapuolen kanssa jonkinlaista kuurupiiloa välttelemällä tämän katsetta. [17]

Ihmisten välisessä vuorovaikutuksessa huomiomme kiinnittyy usein toisen henkilön kasvoihin ja erityisesti katseeseen, ja sama toteutuu myös ihmisen ja robotin välisessä vuorovaikutuksessa [16]. Ihmiset kiinnittävät huomionsa keinotekoisissa kasvoissa ensimmäiseksi silmiin, sitten nenään ja kolmantena suuhun [19]. Oletuksena siis on, että katseen merkitys on suuri myös ihmisen ja robotin vuorovaikutuksessa.

Parhaat tulokset ihmisen ja robotin välisessä kanssakäynnissä on saatu, kun robotin katseen kohdistaminen on ollut vaihtelevaa, eli kun katse on vaellellut ja liikkunut epäsäännöllisesti kohteesta kohteeseen, ja noudattanut ihmiselle luontaisia liikeratoja [18]. On myös havaittu, että etenkin toisen osapuolen ollessa puheenvuorossa voi robotti osoittaa mielenkiintonsa suuntaamalla itsensä puhujaa kohti, mikä tekee kanssakäymisestä luonnollisemman ja miellyttävämmän [16]. Katseen ollessa tärkeä osa kanssakäyntiä, tulisi sen myös kohdistua puhujaa kohti, mutta ei kuitenkaan vain jähmettyneenä puhujan kasvoihin, vaan satunnainen katseen harhailu tässäkin loisi luonnollisemman kuvan robotista [18].

Kanssakäymisen sulavoittamiseksi edelleen, tulisi robotin olla tietoinen ympäristöstään [20] ja aloittaa sekä lopettaa kanssakäynti luontevasti, kuten tervehtimällä ja hyvästelemällä [21]. Kanssakäynnin aloittamisessa ja mielenkiinnon osoittamisessa robotin katse ja liikehdintä ovat tärkeitä osia lähestyttämisen saavuttamiseksi omillaankin, mutta tehoavat ennen kaikkea yhdessä käytettyinä [22]. Robotin eleet auttavat ihmistä kokemaan vuorovaikutuksen luonnollisempana ja pitämään mielenkiintoa yllä myös kanssakäymisen jo alettua [16, 22]. Tämä voidaan toteuttaa robotissa esimerkiksi seuraamalla ihmisosapuolen kasvoja hänen puhuessaan, suuntaamalla pään kohti asioita, joista puhutaan, nyökkäämällä ymmärtämisen merkiksi tai suuntaamalla päätä pois ihmisosapuolesta robotin ollessa puheenvuorossa [16].

Suhtautumiseen ihmisenkaltaisiin robotteihin voivat kuitenkin vaikuttaa pelkän robotin itsensä luoman vaikutelman lisäksi myös havainnoijan omat ominaisuudet, kuten ikä ja aiempi kanssakäyminen robottien kanssa [23]. Siinä missä toistuvasti robottien kanssa tekemisissä olleiden suhtautuminen on muuttunut yleisesti positiivisemmaksi ihmismäisiä robottejakin kohtaan [22], ovat naiivit katsojat suosineet karikatyyrisempiä robotteja [17].

Haasteeksi ihmismäisen robotin kehityksessä voivat nousta muun muassa kustannukset, saatavilla oleva teknologia tai ajanpuute, jolloin robotti voi jäädä kauas ihmisen tasosta. Kun resurssit eivät riitä tarpeeksi ihmistä muistuttavan androidin luomiseen, voidaan robotin kehittäjällä nähdä olevan kaksi vaihtoehtoa. Ensimmäisessä robotista luodaan selkeästi robottimainen, jopa karikatyyrinen, jolloin voidaan saavuttaa ainakin hienoinen positiivinen suhtautuminen [4, 15]. Karikatyyrisen robotin onkin havaittu pärjäävän paremmin sosiaalisissa kanssakäymisissä vähän robottien kanssa tekemisissä olleiden kanssa [17]. Toinen vaihtoehto on se, että robotista pyritään luomaan saatavilla olevien resurssien puitteissa mahdollisimman ihmismäinen, jolloin on tärkeämpää tiedostaa mahdolliset luotaantyöntävät piirteet, ja tarpeen tullen mukauttaa niitä niin, että osallistuja ei enää kokisi niitä negatiivisina, vaan parhaassa tapauksessa ne auttaisivat miellyttävän kanssakäymisen saavuttamisessa.

2.3. Pään, silmien ja suun liikkeet ihmisillä

Ihmissilmän liikkeet voidaan jakaa katseen vakauttaviin ja katseen suuntaa muuttaviin. Vakauttavat liikkeet pyrkivät kompensoimaan pään liikkeitä tai estämään muita silmien liikkeitä, säilyttäen näin katseen suunnan vakiona. Katseen suuntaa muuttavat liikkeet pyrkivät kohdistamaan katseen suunnan kohti uutta kohdetta tai seuraamaan liikkuvaa kohdetta. Silmän liikkeet ovat yleensä joko nopeita ja nykäysmäisiä tai hitaita ja tasaisia. [24, 25]

Pään liikkeet tapahtuvat pääasiassa kolmesta eri syystä: katseen suunnan muuttamisessa yhteistyössä silmien kanssa, muun kehon liikkeen kompensoinnissa katseen suunnan pitämiseksi vakaana sekä sosiaalisen vuorovaikutuksen yhteydessä osana elekieltä. [26]

Suu voi liikkua ja muuttaa asentoaan lukuisista eri syistä. Vuorovaikutustilanteessa kenties näkyvin ja merkittävin suun käyttötapa on kuitenkin puheen synnyttäminen, joten laajan tarkastelun sijasta keskitytään suun liikkeeseen ihmisen puhuessa.

2.3.1. Silmien liikkeet

Osa silmien liikkeistä pyrkii säilyttämään katseen suunnan vakiona pään liikkeistä huolimatta [24, 25]. Pään kääntyessä tai siirtyessä silmät kääntyvät vastakkaiseen suuntaan samalla nopeudella, jolloin liikkeistä aiheutuvat katseen suunnan muutokset kumoavat toisensa [24, 25]. Pään liikkeitä kompensoivat liikkeet hyödyntävät tasapainoistia [24, 25], tietoa kaulan lihasten venytystä [25] sekä tarvittaessa myös visuaalista informaatiota [24].

Pään ja katseen kohteen pysyessä paikoillaan, niin kutsutut fiksaatiot pyrkivät pitämään katseen suunnan muuttumattomana [24, 25]. Fiksaatioissa uusiin kohteisiin hakeutuvat silmien liikkeet ovat estettynä [24]. Silmät eivät kuitenkaan pysy täysin paikoillaan, vaan tekevät jatkuvasti pieniä liikkeitä, jotka voivat olla nykäysmäisiä tai tasaisia [25].

Niin sanotut sakkadiset silmän liikkeet ovat nopeita ja nykäysmäisiä liikkeitä, jotka pyrkivät suuntaamaan katseen kohti uutta kohdetta [24, 25]. Sakkadinen liike voi käynnistyä esimerkiksi uuden kohteen ilmestyessä näkökenttään, ja sitä edeltää noin 200 millisekunnin viive [24]. Liike alkaa nopealla kiihdytyksellä ja päättyy nopeaan hidastumiseen, ja sen maksiminopeus voi olla jopa 400-600 astetta/s [25]. Sakkadisten liikkeiden kesto vaihtelee välillä 30-120 ms ja liikkeiden välissä on 100-200 millisekunnin viive [25].

Tasaisesti liikkuvaa kohdetta seurattaessa silmät liikkuvat hitaasti ja tasaisesti [24, 25]. Tällaisten liikkeiden nopeus vaihtelee välillä 1-30 astetta/s ja niiden kiihtyvyys on rajoitettu [25]. Ne eivät myöskään ole tahdonalaisia, vaan edellyttävät seurattavan kohteen olemassaolon aktivoituaan [25].

2.3.2. Pään liikkeet

Pään liikkeet voivat osallistua katseen suunnan muuttamiseen, jolloin suuremmat suunnan muutokset ovat mahdollisia, ja silmät joutuvat harvemmin ääriasentoon.

Taipumus hyödyntää pään liikkeitä katseen suunnan muuttamisessa vaihtelee yksilöiden välillä. Useimmilla pää ei kuitenkaan liiku alle 15 asteen muutoksissa, kun taas yli 50 asteen muutos silmän keskiasennosta ei ole mahdollinen ilman pään liikuttamista. Uuteen kohteeseen hakeutuessa pää liikkuu silmiä hitaammin, minkä seurauksena sen liike jatkuu vielä silmien jo suuntauduttua kohteeseen. Silmät korjaavat tällöin katseen suuntaa kompensoivilla liikkeillä, kunnes pää on pysähtynyt. [26]

Kompensoivat pään liikkeet pyrkivät säilyttämään pään sijainnin ja asennon samana muun kehon liikkeistä huolimatta. Pää pyrkii kääntymään liikkeelle vastakkaiseen suuntaan. Tähän hyödynnetään tasapainoainin tuottamaa informaatiota. [26, 27]

Pään liikkeet toimivat myös osana sanatonta viestintää. Sosiaalisessa vuorovaikutuksessa pään asennolla voidaan viestiä esimerkiksi surua tai ylpeyttä. Nyökkäämällä voidaan viestiä myöntävää vastausta ja päätä pudistamalla kieltävää. [26]

2.3.3. Suun liikkeet puhuessa

Vuorovaikutustilanteissa ihminen voi käyttää suutaan osana sanatonta viestintää, esimerkiksi tunteiden ilmaisemiseksi, mutta sen merkittävin tehtävä vuorovaikutuksessa on kuitenkin sanallisen viestinnän mahdollistaminen. Suu yhdessä äänihuulten kanssa luo äänteitä, jotka rakentuvat sanoiksi. Kansainvälisessä foneettisessa aakkostossa (engl. International Phonetic Alphabet eli IPA) eri äänteet on eroteltu toisistaan luokittelemalla ne ääntämiseen liittyvien piirteiden perusteella. Tällaisia piirteitä ovat esimerkiksi huulten asento ja äänteen ääntymispaikka. Vokaaleja äännettäessä suu on yleisesti enemmän auki kuin konsonanteja äännettäessä. Puhuessa suuaukon koko ja muoto riippuvat huulten ja alaleuan asennosta, joihin edelleen vaikuttaa esimerkiksi kielen asento suun sisällä.

Vokaalien kohdalla suuaukko on tyypillisesti avoin, mutta avonaisuuden aste voi vaihdella huulten asennosta riippuen. Arvioidessa suun avonaisuutta eri äänteiden kohdalla voidaan hyödyntää IPA:n jaottelua. Tärkeimpinä piirteinä vokaalien kohdalla voidaan pitää jakoa laveisiin ja pyöreisiin vokaaleihin, sillä nämä termit kuvaavat huulten asentoa ääntämishetkellä, sekä suppeutta tai laveutta, eli kielen korkeutta ääntämishetkellä, jolla on pääsääntöisesti yhteys huulten pyöreyyteen. Ääntämishetkellä pyöreissä vokaaleissa huulet ovat pyöristettyinä ja hieman työnnettyinä eteenpäin, jolloin niiden väliin jää pienempi ilmarako kuin laveissa vokaaleissa, joissa huulet ovat joko rentoina tai hieman leveyssuuntaan venytettyinä. Laveuden ja pyöreyyden aste voi vaihdella ja vokaalit, joissa kieli on korkealla äännettäessä ovat edelleen pyöreämpiä, eli huulet ovat lähtökohtaisesti lähempänä toisiaan, ja vokaalit, joissa kieli on matalalla ovat edelleen laveampia, eli huulet ovat lähtökohtaisesti avonaisemmat. [28 s. 35—36, 43—44]

Taulukko 1. Suomen kielen vokaaliäänteet

	Etinen		Takainen	
	Lavea	Pyöreä	Lavea	Pyöreä
Suppea	i	y		u
Lähes suppea				
Puolisuppea	e	ø		o
Välinen				
Puoliväljä				
Lähes väljä	æ			
Väljä			ɑ	

Myös suomen kielen konsonantteja voidaan jakaa IPA:n luokitteleman ääntämistavan ja -paikan mukaan, joskin erottelu on monimutkaisempi tehdä. Ääntämistavat voivat vaihdella voimakkaasti konsonanttien välillä ja nimellisesti samakin konsonanttiäänne voidaan ääntää eri tavalla riippuen yhteydestä. Esimerkkeinä [k]:n ääntymispaikka voi vaihdella merkittävästi sitä seuraavien vokaalien johdosta, ja tyypillisesti äänihuulissa syntyvä [h] äänne muuttuu enemmän kitalaessa äännettyksi sanassa *vihje* [28 s. 77, 80]. Tämän johdosta kielen ja suun asennot voivat vaihdella, joten yleisesti päteviä avonaisuuden asteita voi olla haastava määrittää. Ääntämispäikan mukaan suomen kielen konsonantit voidaan ryhmitellä bilabiaaleihin, joissa huulet ovat ääntämishetkellä täysin kiinni toisissaan, labiodentaaleihin, joissa ylähampaat koskettavat alahuulta, dentaaleihin, joissa kieli koskettaa ylähampaiden takaosaa, alveolaareihin, joissa kieli koskettaa kitalakea hampaiden takana, palato-alveolaareihin, joissa kieli koskettaa kitalakea hampaiden takaosan ja kovan kitalaen välissä, palataalisiin, joissa kieli koskettaa kovaa kitalakea, velaareihin joissa kieli koskettaa kitalaen takaosaa sekä laryngaaleihin, joissa ääntäminen tapahtuu kurkunpäässä [28 s. 69]. Peilaten takaisin vokaalien ääntämiseen, voidaan karkeasti määrittää suun avonaisuuden kasvavan sen mukaan, mitä taempana suuta ääntäminen tapahtuu.

Taulukko 2. Suomen kielen konsonanttiäänteet

Bilabiaali	Labiodentaali	Dentaali	Alveolaari	Palato-alveolaari	Palataali	Velaari	Laryngaali
m		n			ŋ		
p b		t d			k g		ʔ
	f v	s z		ʃ ʒ			h
					j		
			r				
		l					

2.4. Pään, silmien ja suun liikkeet robotiikassa

Silmien ja suun liikkeet sekä pään liikkeet kokonaisuutena ovat suuri vaikuttaja ihmistä muistuttavan robotin luonnollisuuden vaikutelman muodostamiseen [17]. Nämä liikkeet ovat usein toteutettu yksinkertaisilla servomoottoreilla, jotka yksinään pystyvät tuottamaan rajoitettuja liikkeitä. Usean moottorin käyttäminen ja sitä

kautta usean akselin yhtäaikainen liikuttaminen tai kiertäminen mahdollistaa monimutkaisempien ja luonnollisempien liikeratojen saavuttamisen.

Ihmismäisempien liikkeiden saavuttamiseksi jotkut toteutukset käyttävät keinotekoisia lihaksia, joiden toiminta sekä sijoitus robotin ruumiissa jäljittelevät ihmisen anatomiaa. Verrattuna perinteisiin servomootoreihin tekolihasien on huomattu lisäävän robotin liikkeiden luonnollisuutta sekä eläväisyyttä [29], mutta niiden käyttö on vielä rajoitettua etenkin tutkimustyön ulkopuolella. Tähän syynä on keinotekoisten lihasten keskinkertainen suorituskyky sekä valmistamisen monimutkaisuus perinteisiin servomootoreihin verrattuna [30, 31].

Pään ja kasvojen tekemät liikkeet riippuvat robotin käyttötarkoituksesta. Paikallaan pysyville roboteille ei ole tarpeellista ohjelmoida kehon liikkeen takia katseen suunnan vakauttavia liikkeitä. Teollisuuskäyttöön suunniteltaville roboteille, joiden pääkäyttötarkoitus ei yleensä vaadi ihmismäisiä liikkeitä, ei taas ole tarpeellista ohjelmoida monimutkaisia eleitä. Kun robotti lähenee ulkonäöltään ihmistä, sen liikkeidenkin täytyy olla yhä ihmismäisempiä outo laakso -ilmiön välttämiseksi [32].

2.4.1. Pään liikuttaminen

Yksinkertainen tapa liikuttaa robotin päätä on ohjata yhtä pään pyörimisakseleista servomootorilla. Tällä tavalla voidaan saada aikaan yksinkertaisia liikkeitä, kuten pään nyökkääminen tai karkea pään suuntaaminen haluttua huomion kohdetta kohti. Lisäämällä moottoreita voidaan saavuttaa usean akselin yhtäaikainen kiertäminen, jota hyödyntämällä voidaan kasvattaa mahdollisten eleiden lukumäärää. Kun ihmismäisten liikkeiden ja eleiden täydellinen kopioiminen ei ole tarpeellista tai se on taloudellisesti epäkäytännöllistä, pään liikuttaminen voidaan toteuttaa vain muutamalla moottorilla. Aldebaran Roboticsin massatuotantoon suunniteltu Pepper-robotti käyttää kahta niskan alueelle sijoitettua moottoria pään sivulle kääntämiseen ja pystysuunnassa kallistamiseen [33]. Engineered Artsin RoboThespian taas käyttää kolmea pään sisälle sijoitettua moottoria [34]. Kolmas moottori mahdollistaa pään kallistamisen sivulle, mistä on paljon hyötyä muun muassa taide-esityksiin suunnitellun RoboThespianin persoonallisuuden lisäämiseksi.

Pään liikuttamismekanismien suunnittelussa voi myös ottaa inspiraatiota ihmisen omista mekanismeista. Steven Barkerin ja kumppaneiden kehittämä Eddie-robotti käyttää kahdeksaa paineilmalla toimivaa tekolihasta jäljitelläkseen ihmisen niskan ja pään liikkeitä. Nämä lihakset mahdollistavat pään kiertoliikkeiden lisäksi pään translaatioliikkeen, joka lisää robotin luonnollisuutta sekä eläväisyyttä. [29]

Pään liikkeillä voidaan lisätä robotin luontevuutta. Pään sekä silmien kääntämisen samanaikaisesti katseen suunnan vaihtamiseksi on huomattu lisäävän robotin liikkeiden luonnollisuutta [35]. Pään liikkeisiin voidaan myös ohjelmoida erilaisia eleitä robotin puhumisen tueksi.

2.4.2. Silmien liikuttaminen

Ihmismäisten robottien silmät ovat yleensä toteutettu joko fyysisillä, mekaanisesti liikutettavilla silmillä tai virtuaalisilla, LCD-näytöllä simuloituilla silmillä. Tehokkain

tapa saavuttaa biologisten silmien kaltaiset liikeradat on yhdistää silmät kolmeen servomoottoriin, joista kaksi kääntävät silmiä itsenäisesti vaakatasossa ja kolmas kääntää silmiä yhtenäisesti pystysuunnassa. Tätä tapaa käyttävät esimerkiksi Flobi [8] ja iCub [36]. Virtuaalisten silmien käyttö vähentää robotin liikkuvia osia ja siten myös huollon tarvetta. RoboThespienin virtuaaliset mutta silti ihmismäiset silmät voidaan ohjelmoida muun robotin kanssa suorittamaan valmiita liikesarjoja, kuten teatraalisia esiintymisiä [34]. Kahden erillisen moottorin käyttäminen silmien liikkeiden erottamiseksi toisistaan vaakatasossa mahdollistaa katseen tarkan kohdistamisen syvyyssuunnassa.

Silmien suuntaaminen kiinnostuksen kohteita kuten läheisintä ihmistä tai taustasta erottuvaa objektiä päin on tärkeä ominaisuus ihmistä jäljittelevälle robotille. Perinteisesti kasvojen sekä muiden kohteiden tunnistuksessa on hyödynnetty erilaisia kuvadatasta laskettavia ominaisuuksia, jotka tiivistävät sekä kuvaavat paremmin kuvadatasta haluttuja tietoja. Näitä ominaisuuksia käyttämällä voidaan kouluttaa koneoppimismalleja, jotka ovat pelkästään raakaa kuvadataa käyttäviä malleja tehokkaampia. Yksi suosituimmista tätä lähestymistapaa käyttävistä menetelmistä on Paul Violan sekä Michael Jonesin esittämä Haar-ominaisuuksia hyödyntävä kaskadiluokittelija (engl. cascade classifier) [37] sekä muut siihen perustuvat ratkaisut. Tämän luokittelijatyypin lisääminen avoimen lähdekoodin OpenCV-konenäkökirjastoon [38] on helpottanut luokittelijan käyttöä ja tämän myötä tehnyt siitä entistä suosittumman. Toinen suosittu menetelmä on Navneet Dalalin sekä Bill Triggsin esittämä HOG-ominaisuuskuvaajaa (Histogram of Oriented Gradients) hyödyntävä SVM-luokittelija (Support Vector Machine) [39], joka on taas lisätty avoimen lähdekoodin dlib-koneoppimiskirjastoon [40]. Viime vuosina kuitenkin syväoppimisen (engl. deep learning) käyttö on yleistynyt [41] ja tämän takia myös kasvojen tunnistukseen on tehty syväoppimista hyödyntäviä ratkaisuja. Näiden syväoppimismallien on huomattu olevan hyvin tehokkaita kasvojen sekä muiden objektien tunnistuksessa [42, 43].

Jos kasvontunnistukseen käytettävä kamera on sijoitettu robotin päähän tai silmiin, katseen kohdistaminen onnistuu yksinkertaisesti laskemalla tunnistettujen kasvojen sijainnin poikkeama kamerakuvan keskustasta ja muuntamalla tämä servomoottoreiden kääntöarvoiksi, joilla kasvot saadaan siirrettyä kuvan keskelle [44]. Silmiä ja päätä halutaan kuitenkin yleensä kääntää erillisesti toisistaan luonnollisemman katseen saavuttamiseksi. Tätä varten silmien on tehtävä kompensoivia liikkeitä pään kääntyessä, jotta katse pysyy oikeassa suunnassa [45]. Jos robottiin sijoitetaan yksi kamera kumpaankin silmään, voi robotti tarkemman katseen kohdistamisen sekä laajemman näkökentän lisäksi saada ympäristöstään syvyystietoja hyödyntämällä kameroiden eroavia kuvakulmia [46].

Silmien liikkeisiin voidaan myös ohjelmoida ajoittaisia huomion kohteen vaihdoksia eli vilkaisuja. Näitä hyödyntämällä robotti voi muun muassa siirtää huomiota kiinnostuksen kohteisiin vuorovaikutuksessa [47] tai tehdä vuorovaikutuksesta luonnollisempaa.

2.4.3. *Suun liikuttaminen*

Hyvin yksinkertainen tapa toteuttaa suun liikkeet on liikuttaa robotin leukaa ylös ja alas edestakaisessa liikkeessä puheen aikana. Tätä voidaan parantaa yhdistämällä leuan liike jollain tavalla puheeseen, esimerkiksi sen äänenvoimakkuuteen tai itse puheen sisältöön, mutta tämän tyyppiset yhden vapausasteen liikkeet silti rajoittavat suun ilmaisukykyä huomattavasti. Ihmismäisyyden kasvattamiseksi robotti tarvitsee huulet, joita liikuttamalla se voi helpottaa puheen [7] sekä tunteiden [8] tunnistettavuutta.

Ihminen käyttää leuan, huulien sekä muiden suun osien liikuttamiseen useita pieniä lihaksia, joiden täytyy liikkua hyvin erityisillä tavoilla ymmärrettävän puheen ja tätä kautta ihmismäisten liikkeiden muodostamiseksi. Robotit tarvitsevat tämän takia monimutkaisten mekanismien lisäksi huolella suunniteltuja ohjelmistoja muodostamaan ihmismäisiä suun liikkeitä. Carl Strathearnin sekä Eunice Mingua Man kehittämä Euclid-robottipää [5] käyttää kuutta toimilaitetta (engl. actuator) huulien liikuttamiseen sekä yhtä toimilaitetta kielen nostamiseen ja laskemiseen. Tämän lisäksi robotti pystyy liikuttamaan leukaansa. Euclid liikuttaa suutaan Mel-taajuuksien kepsraalikertoimia (engl. Mel-frequency cepstral coefficient eli MFCC) [48] hyödyntävällä koneoppimismallilla, joka muuttaa audiosignaalin sopiviksi servomootoreiden kääntämisarvoiksi. Tämä toteutus kärsii silti jäykistä huulten liikkeistä, kuten on nähtävissä Strathearnin kuvaamissa testivideoissa [49, 50]. Vaikka leuan liikkeet vaikuttavat melko realistisilta, huulien asennot eroavat vain vähän eri äänteiden välillä, tehden robotista epäihmismäisen verrattain realistisesta ulkonäöstä huolimatta.

Mikäli robotti kuitenkin voi mukailla suun asentoja vain avaamalla leukaniveltä eri asteisesti, eikä esimerkiksi huulten asentoja voida tarkasti imitoida, jää vaihtoehdoksi keskittyä suun avonaisuuden asteisiin. Ihmisen puhuessa suuaukon koko ja muoto riippuvat huulten ja alaleuan asennosta, ja avonaisuus vaihtelee täysin kiinni olevasta suusta avonaiseen [28 s. 32—33]. Leukanivelen avaaminen tulisi toteuttaa sopivissa määrin niin, että robotin suun avausaste vastaisi ihmisen suun avonaisuutta kunkin puhutun äänteen kohdalla, esimerkiksi IPA:n luoman äänteiden luokittelun perusteella, ja suun liikkeiden kesto ajoittuisi yhteen robotin tuottaman puheen kanssa. Äänteiden kestoja on kuitenkin kaikissa kielissä loputon määrä, joten niiden kestoa ei voida etukäteen määrittää yleisiin sääntöihin perustuen [28 s.101], vaan se täytyy tehdä käytetyn puhesynteesin mukaan.

3. TOTEUTUS JA TESTAUS

Työn toteutuksen pohjana käytettiin avoimen lähdekoodin 3D-tulostettavaa InMoov-robottia, jonka ohjaamiseen käytettiin Robot Operating System 2 -ohjelmistopakettia. Robottia oli kehitetty aiemmissa kandidaatin tutkielmissa, minkä takia siihen oli toteutettu erinäisiä toiminnallisuuksia. Tämän työn toteutuksena robottiin toteutettiin parannettu kasvojen seuraus, puheesynteesin perusteella liikkuva leuka sekä erinäisiä pään eleitä, joita voidaan suorittaa tarpeen tullen ihmisen ja robotin välisessä vuorovaikutuksessa. Robottia käytiin testaamassa yhteensä kaksi kertaa, kummallakin kerralla Oulun yliopistolla. Ensimmäisen kerran jälkeen robotin pään liikkeisiin tehtiin pieniä muutoksia, joiden toimivuus sekä tehokkuus varmistettiin toisella testikerralla.

3.1. Alkuperäinen toteutus

Kehitysalustana käytettiin 3D-tulostettavaa avoimen lähdekoodin InMoov-robottia [51]. Robotin pää oli liikutettavuudeltaan työn alussa jo valmis, ja silmien liikkeisiin oli jo aikaisemmissa töissä toteutettu kasvojen seuraus sekä muita ihmisen ja robotin vuorovaikutusta parantavia ominaisuuksia.

Robottipään ohjelmiston kehitystä jatkettiin lisäämällä siihen puheeseen sekä tilanteeseen mukautuvia pään ja suun liikkeitä sekä silmien liikkeiden yhdistäminen muihin pään liikkeisiin.

3.1.1. *InMoov-robotti*

InMoov on ranskalaisen suunnittelijan sekä veistäjän Gaël Langevinin suunnittelema humanoidirobotti, jonka lähdekoodin sekä osien 3D-mallit Langevin on julkaissut avoimeen käyttöön projektin sivuilla [51].

Käytetty versio InMoovin päästä käyttää seitsemää moottoria pään sekä kasvojen liikkeiden toteuttamiseen. Pään liikkeisiin on käytössä neljä XL-430 -servomoottoria, joista yksi kääntää päätä sivusuunnassa ja loput ajavat kolmea 3D-tulostettua lineaarimoottoria, jotka mahdollistavat pään kallistamisen sivuille sekä eteen ja taakse. Pään kokoonpanoa on havainnollistettu oheisessa kuvassa (Kuva 2). Silmiä liikuttaa kaksi XL-320 -servoa. Yksi liikuttaa silmiä pystysuunnassa ja toinen sivusuunnassa. Koska silmiä ei voi liikuttaa erillisesti toisistaan, robotin katsetta ei voi kohdistaa tietylle etäisyydelle, mikä antaa robotin katseelle läpi katsovan vaikutelman. Oikeaan silmään on sijoitettu Microsoft LifeCam HD-3000 -web-kamera, jota se käyttää kasvojen tunnistamiseen. Kamera kuvaa videota 1280×800 pikselin tarkkuudella sekä 30 kuvakehystä sekunnissa [52]. Viimeinen XL-320 -servomoottori liikuttaa robotin alaleukaa ylös ja alas.



Kuva 2. InMoov-robotin pää

3.1.2. Robot Operating System

Työssä käytetyn robotin ohjaamiseen käytetään avoimen lähdekoodin Robot Operating System 2 -ohjelmistopakettia (ROS2), joka sisältää useita työkaluja sekä rajapintoja robottien korkeatasoiseen ohjelmointiin. ROS2:n perustuvat järjestelmät koostuvat *solmuista* (engl. node), jotka voivat kommunikoida keskenään lähettämällä ja vastaanottamalla *viestejä* (engl. message) nimettömästi solmun tilaamissa *aiheissa* (engl. topic). Solmut voivat myös käyttää *toimintoja* (engl. action) lähettämään viestejä ja sen jälkeen saamaan jaksottaista palautetta toiminnon vastaanottajalta. Monimutkaisemmissa roboteissa yksi solmu on yleensä tarkoitettu yhden järjestelmän osan suorittamiseen, kuten kameran kuvan tulkitsemiseen tai tietyn robotin osan liikuttamiseen. Yhden robotin solmut voidaan suorittaa yhdessä tai useammassa prosessissa tai jopa erillisillä tietokoneilla. [53]

3.1.3. Suun liikkeen synkronointi puhesynteesin kanssa

Robotin leukaniveltä liikuttaa vain yksi servomoottori, joten suun liikerata rajoittuu pelkästään aukomiseen ja sulkemiseen. InMoov-robotin leuan rakenteen vuoksi leukanivel avautuu vain hyvin rajallisesti, joten se on ääriasennossakin auki vain parin senttimetrin verran (Kuva 3). Liikkeiden tapahtuessa vain yhdellä akselilla ja silläkin vain pieninä liikkeinä, ei suulla voida toteuttaa monimutkaisia ihmistä muistuttavia liikkeitä, vaan leukaniveltä avataan imitoiden ihmissuun avausasteita eri äänneille.

Tämän saavuttamiseksi syntetisoitu puhe annetaan merkkijonona leuan liikettä ohjaavalle solmulle, jossa funktio määrittää jokaiselle merkille avausasteen ja liikkeen keston, jotka välitetään toimintoina leuan avaamiseen käytettävälle servomoottorille. Avausasteet eri kirjaimille annetaan IPA:n tarjoaman jaottelun mukaan ja liikkeiden

kesto tullaan määrittämään robottiin luodun puhesynteesin käyttämän ajoituksen perusteella.



Kuva 3. Leukanivel avattuna ääriasentoon

Leukanivelen ohjaamiseen käytettävän solmun on tarkoitus tilata viestejä puhesynteesin solmulta. Viestit tulevat merkkijonoina, joista leukanivelen solmu määrittää erikseen jokaiselle merkille avausasteen ja välittää sen edelleen niveltä ohjaavalle servomootorille. Avausasteen määrittävälle funktiolle annetaan yksi kerrallaan jokainen merkkijonon merkki, joista määritetään avausaste. Avausaste vaihtelee välillä 0,0—0,5, jossa suu on arvolla 0,0 täysin kiinni ja arvolla 0,5 avattuna ääriasentoon. Kun saadun viestin jokainen merkki on käsitelty ja leukanivel on liikkunut niiden mukaan, annetaan arvoksi 0,0 palauttamaan suu takaisin alkuasentoon, minkä jälkeen solmu jää odottamaan uutta syötettä puhesynteesiltä.

Suun avausaste merkkien suhteen on perustettu IPA:n äänteiden erotteluun (Taulukko 1, Taulukko 2). Merkkijonon kirjaimet kuvataan niitä vastaavina suomenkielisinä äänteinä ja mikäli merkkijonossa esiintyy merkkejä, jotka eivät kuulu suomen kielessä yleisesti esiintyviin äänteisiin, jää robotin suu viimeisimmän kirjaimen avausasteen mukaiseen asentoon, minkä jälkeen seuraava tunnistettu kirjain määrittää mahdollisen uuden avausasteen (Taulukko 3). Esimerkiksi sanoja erottavan välilyönnin ajan suun asento on välilyöntiä edeltäneen kirjaimen mukainen, jolloin välilyöntiä seuraava kirjain määrittää uuden asennon.

Taulukko 3. Avausasteet

Merkki	Avausaste
a	0,5
ä	0,45
e	0,4
i	0,35
o, ö, å	0,3
u, y, ü	0,25
h	0,2
k, g, j, š, ž, q	0,15
n, t, d, s, z, r, l, c	0,1
f, v, w	0,05
m, p, b	0,0
Muut merkit	Edellisen merkin arvo

Niiden kirjainten kohdalla, jotka eivät esiinny suomen kielessä, tai esiintyvät vain harvoissa lainasanoissa, on kirjaimen avausaste määritetty sen yleisimmin korvaavan suomen äänteen mukaisesti. Esimerkiksi c-kirjain äännetään usein kuten suomen kielen s, esimerkiksi sanassa *celsius*, ja w-kirjaimen on katsottu ääntyvän samoin kuin suomen kielen v. Toteutuksessa ei siis tunnisteta sanojen alkuperäkieltä tai äänteiden kontekstia, joten ohjelmisto ei erottele äänteiden muuttumista tavallisesta poikkeaviksi tietyissä yhteyksissä, kuten esimerkiksi *nk-* tai *ng-*kirjainyhdistelmien muuttumista *äng-*äänteiksi tai ääntämyksen poikkeamista suomesta vieraskielisissä sanoissa.

Avausasteiden lisäksi jokaiselle merkille ja kirjaimelle tulisi määrittää myös niiden kesto, jotta suun liikkeet ajoittuisivat yhteen puheen kanssa. Tämän toteuttaminen on kuitenkin mahdollista vasta, kun puhesynteesi on toteutettu osaksi robottia. Näin ollen avausasteen määrittävä funktio ei vielä palauta liikkeen todellista kestoa, minkä seurauksena leuan jokaisen liikkeen kesto on toteutuksessa yhtä pitkä.

3.1.4. Pään liikuttaminen kasvojen seuraamisen parantamiseksi

Aikaisemmin kirjoitetun kandidaatin tutkielman ansiosta robotissa valmiiksi toteutettu kasvojentunnistusjärjestelmä käyttää avoimen lähdekoodin Dlib-koneoppimiskirjastosta [40] löytyvää valmiiksi koulutettua HOG-ominaisuuskuvaajaa hyödyntävää SVM-luokittelijaa [39], joka on helppokäyttöinen sekä nopea ottaa käyttöön koodissa. Luokittelijan tarkkuus suoraan kameraan päin katsovia kasvoja tunnistaessa on hyvä, mutta heikentyy nopeasti, kun kasvot alkavat kääntyä sivulle. Luokittelija ei myöskään pysty tunnistamaan henkilöitä, jotka katsovat pois päin kamerasta. Järjestelmä käyttää myös aiemmassa työssä koulutettua takaisinkytkettyä neuroverkkoa (engl. recurrent neural network eli RNN) tunnistettujen kasvojen huulten liikkeiden tunnistamiseksi. Tätä tietoa käytetään tilanteessa, jossa robotti näkee monta henkilöä, jolloin se pyrkii kääntämään katseensa läheisintä puhuvaa kasvoa päin. Robottiin on myös ohjelmoitu satunnaisia vilkaisuja eli robotin silmät käännetään nopeasti pois päin huomion kohteesta ja sen jälkeen takaisin. [54]

Oheisessa kuvassa (Kuva 4) on havainnollistettu robotin näkökenttää sekä kasvojentunnistusta. Järjestelmä tunnistaa kuvasta kasvat, minkä jälkeen robotti laskee servoilleen kääntöarvot, joilla kasvat saadaan kuvan keskelle. Robotin silmät eivät voi kameran sijainnin ja silmäluomien muodon vuoksi kääntyä paljoa ylöspäin, sillä tällöin suurin osa kameran kuvasta jäisi silmäluomien taakse. Kuvassa järjestelmä on myös tunnistanut henkilön puhumisen, joka ilmenee kasvojen ympärille piirretyin laatikon alle piirretyssä tekstissä.



Kuva 4. Kasvojentunnistusjärjestelmän kuvaa

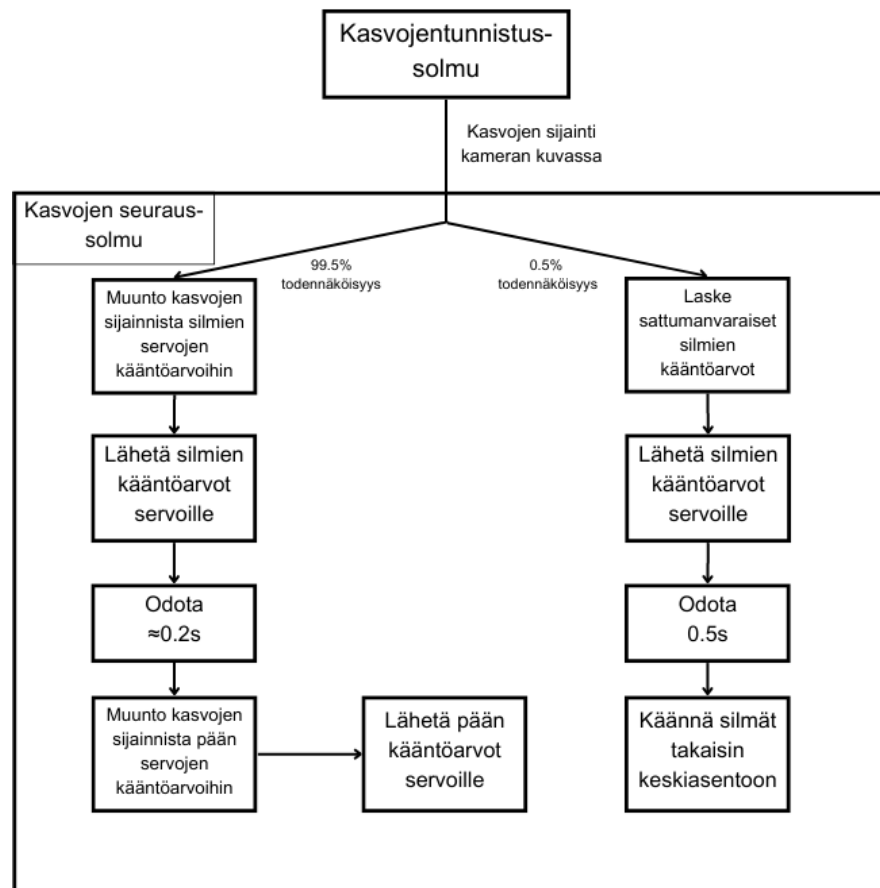
VirtualBox-virtuaalikoneella suoritettussa Ubuntu-pohjaisessa kehitysympäristössä järjestelmän mitattiin tunnistavan kasvoja noin 30 kertaa sekunnissa sekä noin 500 ms sekunnin viiveellä AMD Ryzen 3 4300U-suorittinta käyttäen.

Robotin kasvojentunnistusjärjestelmä käytti alun perin vain robotin silmiä tunnistettujen kasvojen seuraamiseen, minkä takia robotti kykeni aikaisemmin seuraamaan kasvoja vain pienellä alueella. Seuraamisalueen suurentamiseksi järjestelmään lisättiin tässä työssä pään liikuttaminen yhdessä silmien kanssa luonnollisemman vuorovaikutuksen saavuttamiseksi. Päähän ohjelmoitiin myös eteenpäin katsova oletusasento, johon pää kääntyy, kun se ei ole tunnistanut kasvoja viiteen sekuntiin.

Pään liikkeet seuraavat kasvoja samalla periaatteella kuin silmät. Huomattuaan kuvassa kasvat järjestelmä laskee pään servoille kääntöarvot, joilla tunnistetut kasvat saadaan kuvan keskelle. Robotti lähettää kääntökäskyn ensin silmien servoille ja pienen viiveen jälkeen pään servoille. Tällä tavalla pää liikkuu ihmismäisesti silmien perässä. Järjestelmä lähettää pään servoille vain tietyn koon ylittävät liikkeet, jolloin pienet katseen suuntaa tarkentavat liikkeet jäävät tarkemmin sekä nopeammin kääntyville silmille. Tämän ominaisuuden ansiosta myös pään suuntaaminen kasvoja kohti onnistuu paremmin, sillä silmien kääntymistä kasvoja kohti kasvat ovat kuvan

keskellä, jolloin järjestelmä käskisi pään pysyä paikallaan, vaikka se ei olisi ehtinyt kääntyä kokonaan kasvoja kohti. Pienien liikkeiden huomiotta jättäminen mahdollistaa pään kääntymisen kasvoja kohti, minkä aikana silmät tekevät pieniä liikkeitä kasvojen keskellä pitämiseksi. Kasvojen seuraamista on havainnollistettu oheisessa kaaviossa (Kuva 5). Kasvojentunnistus ja kasvojen seuraaminen ovat erillisissä ROS2-solmuissa, mikä selkeyttää ohjelmiston rakennetta. Koska pään liikkeet suoritetaan vain, kun kasvojentunnistussolmu lähettää kasvojen koordinaatteja, vilkaisujen eli sattumanvaraisen silmien kääntämisen tiheys riippuu sekä sille asetetusta todennäköisyydestä että kasvojen koordinaattien julkaisutiheydestä. Jos pään ohjausjärjestelmää suorittavassa tietokoneessa ei riitä laskentateho julkaisemaan koordinaatteja 30 kertaa sekunnissa, vilkaisujen tiheys laskee.

Kaaviossa näytetyn odotusajan lisäksi järjestelmä odottaa noin 0.5 sekuntia pään kääntöarvojen lähettämisen jälkeen ennen kuin se ottaa vastaan uutta kasvojen sijaintia. Pään servot pysähtyvät hetkeksi, kun ne vastaanottavat uusia kääntöarvoja, minkä takia ilman odottamista servot eivät ehdi aloittaa liikkumista ennen uusien kääntöarvojen lähettämistä. Nämä odotusajat kasvattavat pään liikkeiden viivettä, mikä vaikeuttaa nopeasti liikkuvien kasvojen seuraamista.



Kuva 5. Kaavio kasvojen seurauksen toiminnasta

3.1.5. Pään eleet

Robotille toteutettiin kaksi pään elettä: nyökkäys ja pään pudistus. Eleiden testaamista varten toteutettiin myös asiakasohjelma, josta niitä on mahdollista aktivoida syöttämällä halutun eleen nimi, ja valinnaisesti myös eleen ominaisuuksia säätäviä argumentteja. Eleiden toteutuksen sisältävässä solmussa on aihe-rajapinta, jotta niitä olisi yksinkertaista kutsua esimerkiksi puheentunnistuksesta tai puhesynteesistä käsin.

Kummankin eleen toteutuksessa oli otettava huomioon kompensoivat silmien liikkeet, joilla katseen suunta pysyy vakaana pään kääntyessä. Kun päätä käännetään esimerkiksi oikealle pään pudistuksen aikana, on silmiä käännettävä saman verran vasemmalle, jotta katseen suunta säilyisi. ROS2:ssa servoja liikuttaessa voidaan määrittää tavoiteasento ja tavoiteaika, jossa liikkeen pitäisi tapahtua. Toteutuksessa silmien ja pään tavoiteasennot on asetettu vastakkaisiin suuntiin, mutta yhtä suurelle etäisyydelle lähtöpisteestä, ja liikkeiden tavoiteajat keskenään yhtä suuriksi, jotta ne liikkuisivat samalla nopeudella, ja katse pysyisi vakaana.

Myös servojen liikeratojen rajat oli huomioitava, jottei yritettäisi kääntää servoja asentoihin, joihin niiden ei ole mahdollista päästä. Tämä on toteutettu siten, että pään kääntämisestä vastaava `fixed_gaze_head_turn`-funktio, jolle annetaan argumentteina liikkeen suunta ('ylös', 'alas', 'vasen', 'oikea') ja suuruus, lukee ensin servojen senhetkiset asennot, ja laskee tämän jälkeen ylittääkö suoritettava liike joko kaulan tai silmien servojen ääriasentojen rajoja. Mikäli jokin näistä rajoista ylittyy, lasketaan maksimaalinen liikkeen suuruus, jolla ääriasennon rajaa ei ylitetä, ja vaihdetaan se alkuperäisen liikkeen suuruuden tilalle.

Eleet on toteutettu liikesarjoina, jotka hyödyntävät edellä mainittua `fixed_gaze_head_turn`-funktioita. Jokaisen yksittäisen päänkäännähdysliikkeen kestoksi on asetettu 0,4 sekuntia, ja viive yhden liikkeen alusta seuraavan liikkeen alkuun on 0,5 sekuntia. Kumpaakin näistä aika-arvoista on mahdollista säätää elettä kutsuttaessa annettavien argumenttien avulla. Molemmilla eleillä on myös erilliset, yksittäisen päänkäännähdysliikkeen laajuuden määrittävät parametrit, joiden arvot ovat samalla tavalla säädettävissä. Nyökkäys on toteutettu kolmen liikkeen sarjana, jossa päätä käännetään ensin ylös puolet muuttujan määräämästä laajuudesta, sitten alas koko laajuuden verran, ja lopuksi taas ylös sen verran, että palataan lähtöasemaan. Pään pudistuksessa päätä käännetään ensin vasemmalle puolet laajuudesta, sitten oikealle koko laajuuden verran, ja taas vasemmalle, palaten lähtöasemaan. Koska `fixed_gaze_head_turn` ei aina käännä päätä koko sille annetun suuruusarvon verran, ei kummassakaan eleessä riitä asettaa viimeisen liikkeen suuruudeksi puolet eleen laajuudesta, koska tällöin pää saattaisi välillä osoittaa eleen lopuksi väärään suuntaan. Viimeisen liikkeen suuruus lasketaan erikseen hyödyntämällä eleen alussa talteen otettuja tietoja servojen asennoista lähtöasemassa ja vastaavia tietoja toisen liikkeen jälkeisistä asennoista.

3.2. Testauksen asettelu

Testaamisessa tavoitteena oli havainnoida robotin toimintaa ympäristössä, joka vastaisi robotin oletettua käyttöympäristöä mahdollisimman läheisesti, jotta tunnistettaisiin käyttötilanteessa esiin nousevia potentiaalisia haasteita sekä mahdollisesti jo hyvin

toimivia ominaisuuksia. Testaustilanteessa käytössä olivat vain robotin pään ja silmien liikkeet yhdistettyinä kasvojentunnistukseen, sillä robottiin ei ollut vielä toteutettu keskusteluominaisuuksia eli puheentunnistusta ja puhesynteesiä, mutta pään eleitäkin testattiin ajamalla niitä manuaalisesti komentoriviltä. Leuan liikkeiden toimivuus varmistettiin testaustilanteen ulkopuolella. Testauksen aikana seurattiin, kuinka robotti reagoi ohikulkijoihin ja lähestyviin ihmisiin ja mikä ihmisten reaktio oli robottiin. Havainnot kirjattiin ylös ja niitä käytettiin tukena määrittämään jatkokehityksen tarpeet.

Havainnoinnin apuna käytettiin myös kyselyä, joka laadittiin Godspeed-kyselyn [14] viiteen pääkategoriaan nojaten. Kyselyn tavoitteena oli saada ulkopuolisten havainnoijien kokemuksen pohjalta parempi käsitys robotin sen hetkisistä ominaisuuksista sekä tunnistaa mahdolliset kehitettävät ja hyvin toimivat ominaisuudet. Vastaajia pyydettiin myös arvioimaan aiempaa kokemustaan robottien parissa, sillä enemmän robottien parissa toimineiden suhtautumisen on havaittu olevan yleisesti positiivisempaa robotteja kohtaan. Lisäksi vastaajille annettiin mahdollisuus antaa palautetta kirjoitetussa muodossa sekä robotista että kyselystä itsessään.

Testaaminen toteutettiin iteratiivisesti kahdella eri kerralla niin, että ensimmäisen kerran jälkeen kerättyjen havaintojen ja palautteen pohjalta robotin ominaisuuksia paranneltiin, jotta seuraavalle testauskerralle mahdollisimman moni ilmenneistä ongelmista olisi ratkaistu robotin toteutuksessa, ja voitaisiin edelleen tunnistaa lisää kehityskohtia jatkokehitykseen. Lisäksi myös kysely pyrittiin havaintojen pohjalta mukauttamaan paremmin testaustilanteeseen soveltuvaksi, kuitenkin pitäen alkuperäisen kyselyn rungon ehjänä, jotta vastaukset olisivat edes auttavasti vertailukelpoisia kahden eri testauskerran välillä.

3.2.1. Testaustilanne

Robotin oletettu käyttöympäristö tulee olemaan messuhalli, jossa kulkee paljon ihmisiä. Robotin päätavoitteena on kyetä vuorovaikutukseen ihmisten kanssa, mutta sen tulisi myös olemuksellaan herättää ihmisten mielenkiinto, jotta he lähestyisivät robottia vuorovaikutustilanteen mahdollistamiseksi. Testaustilanteen ympäristön haluttiin vastaavan mahdollisimman läheisesti todellista käyttöympäristöä, joten testaukseen tarvittiin laaja sisätila, jossa robotin ohi kulkee paljon ihmisiä, ja jossa ihmisillä on mahdollisuus lähestyä robottia. Täten testausympäristöksi valikoitui keskeisellä paikalla Oulun yliopistoa sijaitseva aula.

Robotti asetettiin näkyvälle paikalle, jossa ohikulkijoilla oli mahdollisuus lähestyä robottia vapaasti. Robottiin kehitettyjen ominaisuuksien toimintaa haluttiin arvioida käytännössä. Lisäksi haluttiin nähdä, kuinka aiemmin kehitetyt toiminnallisuudet toimivat. Kun robotista kiinnostuneet olivat hetken ajan tutustuneet sen ominaisuuksiin, heitä pyydettiin vastaamaan kyselyyn, jossa he voivat antaa kirjallisen version robotin herättämistä ajatuksista.

3.2.2. Kysely

Testauksen tukena käytetty kysely on löyhästi johdettu Bartneckin ym. luomasta Godspeed-kyselystä [14] robotin ominaisuuksien mittaamiseen. Alkuperäisen Godspeed-kyselyn viisi pääkategoriaa ovat ihmisenkaltaisuus, eloisuus, pidettävyys, älykkyys ja koettu turvallisuus, joiden mittaamista käytettiin luodun kyselyn pohjana. Kyselyssä palautetta haluttiin ennen kaikkea robotin liikkeistä, mutta myös robotin yleisestä olemuksesta ja miellyttävyydestä. Kyselyn tavoitteena oli saada käyttäjiltä palautetta vuorovaikutuksesta robotin kanssa heidän kokemansa perusteella. Kysely toteutettiin Google Forms -lomakkeena, johon ihmiset pääsivät vastaamaan lukemalla robotin vieressä olleen QR-koodin.

Robotin kyky vuorovaikutukseen oli vielä hyvin rajoittunut, joten Godspeed-kyselyn tai laajuudeltaan sitä vastaavan kyselyn toteuttaminen ei vaikuttanut mielekkäältä, sillä yksityiskohtaisten piirteiden ja puutteiden arvioiminen keskeneräisestä robotista voisi osoittautua hankalaksi. Täten kyselyä päädyttiin tiivistämään niin, että robotista voitaisiin arvioida yleisvaikutelmaa yksityiskohtaisten piirteiden sijasta. Lisäksi liikkeiden toteuttamisen ja kehityksen ollessa keskiössä, haluttiin kyselyn ottavan erityisesti kantaa niiden toteutukseen. Liikkeisiin liittyvien kysymysten sijoittaminen yhteen tiettyyn kategoriaan on haastavaa, sillä ne voivat yhtäaikaaisesti vaikuttaa ihmisen mielikuvaan useista robotin piirteistä, esimerkiksi selkeästi ympäristön tarjoaman ärsykkeen aiheuttama liike voi vaikuttaa robotista välittyvään älykkyyteen, ihmisenkaltaisuuteen sekä eloisuuteen.

Käytetyn kyselyn neljä ensimmäistä kysymystä keskittyivät suoraan robotin liikkeisiin. Liikkeiden on katsottu viittaavaan pääosin robotista välittyvään ihmisenkaltaisuuteen sekä eloisuuteen. Neljä seuraavaa kysymystä tiedustelivat suoraan vastaajien mielipiteitä robotin ominaisuuksista, sekä heidän omia tuntemuksiaan vuorovaikutuksesta robotin kanssa. Yhdeksännessä kysymyksessä vastaajaa pyydettiin arvioimaan aiempaa kokemustaan robottien kanssa, jotta voitiin arvioida kokemuksen mahdollista yhteyttä muihin vastauksiin. Kysymyksissä 10–12 vastaajat saivat antaa omin sanoin palautetta robotin piirteistä, joista he pitivät tai eivät pitäneet, sekä omia kehitysehdotuksiaan robotin liikkeisiin. Lisäksi kyselyn lopussa vastaajille annettiin mahdollisuus antaa palautetta itse kyselystä, jotta sitä voitaisiin kehittää tuleviin testausilanteisiin. (Taulukko 4)

3.3. Ensimmäinen testauskerta

Ensimmäisellä testauskerralla robotti oli esillä Oulun yliopiston aulassa neljän tunnin ajan. Tässä vaiheessa robotin kokoonpano koostui robotin päästä ja kaulasta, joka oli kiinnitettynä pleksilevyyn (Kuva 2). Robottipää asetettiin yliopiston aulaan käytävän reunalle noin 140 senttimetriä korkealle pöydälle, jossa sen kasvot olivat suunnattuina ohikulkeviin ihmisiin. Robotin kanssa tekemisissä olleille annettiin ensimmäisellä testauskerralla mahdollisuus vastata suomenkieliseen kyselyyn ja tilanteessa esiin nousseet havainnot kirjattiin ylös.

Taulukko 4. Kysely

Numero	Kysymys	Kategoria
1.	Kuinka luonnollisiksi koit robotin liikkeet asteikolla 1—5?	Liike
2.	Kuinka ihmismäisiksi koit robotin liikkeet asteikolla 1—5?	Liike
3.	Kuinka sulaviksi koit robotin liikkeet asteikolla 1—5?	Liike
4.	Kuinka tarkoitukselliseksi koit robotin liikkeet asteikolla 1—5?	Liike
5.	Kuinka hyvin koit robotin reagoivan ympäristöönsä asteikolla 1—5?	Liike
6.	Kuinka älykkääksi koit robotin asteikolla 1—5?	Älykyys
7.	Kuinka miellyttäväksi koit robotin asteikolla 1—5?	Pidettävyys
8.	Kuinka rauhalliseksi koit olosi robotin seurassa asteikolla 1—5?	Koettu turvallisuus
9.	Kuinka paljon olet aikaisemmin ollut robottien kanssa tekemisissä asteikolla 1—5?	Aiempi kokemus
10.	Mistä pidit robotissa?	Vapaamuotoinen palaute
11.	Mistä et pitänyt robotissa?	Vapaamuotoinen palaute
12.	Miten robotin liikkeitä voisi mielestäsi parantaa?	Vapaamuotoinen palaute
13.	Miten tätä kyselyä voisi mielestäsi parantaa? Oliko kyselyssä jotain, joka toimi mielestäsi hyvin?	Palaute kyselystä

3.3.1. Ensimmäisen testauskerran aikana esiin nousseet havainnot

Robotin näkökentän havaittiin olevan hyvin rajallinen, johtuen useasta eri syystä. Ensinnäkin kasvojentunnistukseen käytettävä kamera on sijoitettu robotin oikeaan silmään, minkä vuoksi robotti tunnistaa ja kykenee seuraamaan kasvoja laajemmalla sektorilla oikealla kuin vasemmalla puolella. Lisäksi kamera on niin syvällä robotin päässä ja silmät sijoitettuina niin ylös, että robotin silmien edessä ja ympärillä olevat osat peittävät osan näkökentästä, varsinkin näkökentän yläreunassa (Kuva 4). Tämän takia ihmisten kasvot jäävät helposti näkymättömiin. Olikin havaittavissa, että robottia lähestyvän henkilön tulisi jäädä noin metrin päähän robotista, jotta hän pysyisi robotin näkökentässä, sillä liian lähellä seisovan kasvot jäävät joko yläsilmäluomen taakse tai jommallekummalle sivulle kameran ulkopuolelle. Robotista katsoen vasemmalle puolelle liikkuvan henkilön kasvot karkaavat erityisen helposti näkymättömiin, johtuen kameran sijainnista oikeassa silmässä.

Kasvojen seuraamisessa ongelmat eivät jääneet pelkkään näkökentän rajallisuuteen, sillä kasvojentunnistamisessa ja kameran ominaisuuksissakin havaittiin parantamisen varaa. Kasvojentunnistus vaatii, että henkilön kasvot ovat lähes kohtisuorassa robottiin, jolloin esimerkiksi robotin edestä poikittain tai viistosti kävelevien ihmisten kasvoja ei kyetty tunnistamaan. Lisäksi kameran tarkkuudesta johtuen robotti tunnistaa ihmisten kasvot vasta heidän ollessa noin 3—5 metrin päässä robotista, mutta näilläkin etäisyyksillä kasvojentunnistaminen ei ole enää jatkuvaa. Lyhyt näkökenttä tilassa, jossa robotin edessä on jatkuvasti paljon ihmisiä, ei välttämättä ole huono asia, mutta voi vaikuttaa kuitenkin ihmisten suhtautumiseen, sillä robotti ei kykene havainnoimaan heitä etäisyydeltä, jolta ihmiset voivat jo helposti tunnistaa robotin.

Ongelmia korostivat edelleen robotin silmien ja pään liikkeiden toteutus. Robottiin ei ole toteutettu liikkeessä olevan ihmisen nopeuden arvioimista, minkä seurauksena robotti ei osaa ennakoida liikkeessä olevien kasvojen tulevaa sijaintia. Tämän, ja liikkeiden viiveen vuoksi, robotti kääntää katseensa usein kohtaan, jossa kasvot olivat, eikä sinne, missä kasvot tulevat olemaan. Tällöin robotti saattaa siis katsoa vastakkaiselle puolelle, kuin mihin ihminen on siirtynyt, jolloin kasvot myös yleensä jäävät näkökentän ulkopuolelle ja robotti kadottaa seurattavan ihmisen.

Pään kääntämisen oletusasentoon huomattiin olevan parempi vaihtoehto tilanteelle, jossa robotti jää henkilön kadotettuaan katsomaan mielivaltaiseen suuntaan. Molemmissa tilanteissa robotti kuitenkin jää katsomaan elottomasti yhteen suuntaan, minkä huomattiin olevan luonnotonta sekä mahdollisesti vähensi ohikulkijoiden mielenkiintoa robotista. Useat henkilöt yrittivät myös kiinnittää robotin huomion sen näkökentän laidalta eri eleillä, kuten käden heiluttamisella. He todennäköisesti olettivat ihmistä muistuttavan robotin ymmärtävän ihmisten käyttämiä eleitä.

Myös pään liikkeisiin käytetyssä mekaniikassa havaittiin kehitettävää, sillä etenkin päätä eteen- ja taaksepäin kallistava lineaarimoottori sekä päätä sivuille kallistavat kaksi lineaarimoottoria olivat toiminnaltaan epäluotettavia. Päätä eteen ja taakse kallistavan lineaarimoottorin liikuttamiseen käytettävä servomoottori ylikuormittui helposti pään painon alla, jolloin robotin pää jäi usein jumiin alaspäin katsovaan asentoon. Päätä sivuille kallistavat lineaarimoottorit ovat rakenteellisesti suunniteltu liikkumaan yhtäaikaaisesti kallistamisen onnistumiseksi, mutta käytännössä servomoottoreiden liikuttaminen yhtäaikaisesti sopivalla nopeudella ilman servojen jumiin jäämistä osoittautui haasteelliseksi. Jotta mahdollisilta rakenteellisilta vaurioilta vältyttiin, otettiin pään kallistus sivuille pois käytöstä testaamisen ajaksi.

Vaikkakin robotti pystyy kääntämään päätänsä ilman suurempia ongelmia, tämän mekanismissa havaittiin silti puutteita. Pään kääntämiseen käytettyjen hammasrattaiden välinen yhteys on hieman väljä, minkä takia servomoottorin liike ei välity välittömästi pään liikkeeseen. Moottorin täytyy liikkua hieman ennen kuin hammasrattaat saavat toisistaan kunnollisesti kiinni, minkä takia pään liikkeessä on enemmän viivettä sekä pään liikuttamisen tarkkuus on huonompi. Pää voi myös nopeissa liikkeissä kääntyä hieman halutun arvon yli, mikä lisää robotin tekemien pienten korjausliikkeiden määrää.

3.3.2. Kyselyn tulokset ensimmäisellä testauskerralla

Kyselyyn vastasi 12 osallistujaa, joista kahdeksan antoi myös kirjallista palautetta yhteen tai useampaan kohtaan. Saatujen vastausten määrä on näin ollen hyvin pieni, joten aukottomia johtopäätöksiä aineistoista ei voida vetää. Kyselyn tuloksia tulisi pitää lähinnä suuntaa antavina, asettaen enemmän painoarvoa vapaamuotoiselle kirjoitetulle palautteelle. Vastauksien perusteella robotista välittyneet mielikuvat olivat kuitenkin enimmäkseen positiivisia: robotin liikkeitä ja piirteitä numeerisesti mitanneissa kysymyksissä 1.—8. oli kussakin vastausten keskiarvo yli kolmen, yhteiskeskiarvon ollessa 3,51.

Parhaan tuloksen robotti sai kysymyksestä 4. *Kuinka tarkoitukselliseksi koit robotin liikkeet asteikolla 1—5?*, jossa vastausten keskiarvo oli 4,08. Vaikuttaa siis siltä, että vastaajat pystyivät ymmärtämään miksi robotti liikkui milloinkin tietyllä tavalla. Myös testauksen aikana olikin havaittavissa, että robotin tunnistaessa kasvoit se pystyi seuraamaan kasvoja hyvin, mikä voi osittain selittää tätä tulosta.

Huonoimmat tulokset robotti sai kysymyksistä 2. *Kuinka ihmismäisiksi koit robotin liikkeet asteikolla 1—5?* ja 3. *Kuinka sulaviksi koit robotin liikkeet asteikolla 1—5?*, joissa molemmissa vastausten keskiarvo oli 3,08. Tämä saattaa osittain selittyä robotin mekaniikassa todetuilla puutteilla, kuten päätä kallistavien moottorien

epäluotettavuus tai pään kääntämisessä hyödynnettävän hammasrattaan väljyys, mutta viittaa kehittämistarpeisiin liikkeiden ohjelmoinnissa.

Paljon robottien kanssa tekemisissä olleet ovat yleensä suhtautuneet robotteihin positiivisemmin [22], mutta nyt samaa ilmiötä ei kuitenkaan ollut havaittavissa (Taulukko 5). Kuitenkin mainitsemisen arvoista on, että perusjoukko on erittäin pieni ja esimerkiksi arvosanan 1 aiemmasta kokemuksesta robottien parissa antoi vain yksi vastaaja, jolloin yksittäinenkin arviointi muuttaa tuloksia jo merkittävästi. Vaikuttaa kuitenkin siltä, että muilla vastaajilla oli edes jonkinasteista kokemusta robottien parissa, minkä voi olettaa edesauttaneen heidän kykyään arvioida testattavan robotin ominaisuuksia.

Taulukko 5. Vastaajien aikaisempi kokemus robottien parissa asteikolla 1—5 verrattuna muiden kysymysten keskiarvoon

Numeerinen vastaus aiemmasta kokemuksesta	Vastausten lukumäärä	Kysymysten 1.—8. keskiarvo
5	0	-
4	2	3,38
3	6	3,29
2	3	3,83
1	1	4,125

Kirjoitettua palautetta robotista pyydettiin kolmessa kysymyksessä, joissa kysyttiin mistä vastaaja piti robotissa, ei pitänyt robotissa ja miten robottia voisi vastaajan mielestä kehittää. Suurin osa kirjallisista vastauksista keskittyi robotin ulkomuotoon: kaksi vastausta kehui silmiä, yksi kehui ulkomuotoa yleisesti tarkentamatta sen enempää, robottia keuhuttiin hienoksi ja hauskaksi ja sen kerrottiin olevan "ei pelottava".

Numeerisissa vastauksissa huonoimmat arvosanat saivat liikkeiden ihmismäisyys ja sulavuus, ja kirjallisissakin vastauksissa liikkeissä nähtiin parantamisen varaa, sillä yksi vastaaja koki liikkeet hieman jäykkänä. Osa vastaajista ei myöskään pitänyt robotin ulkonäöstä, sillä sen koettiin olevan epämiellyttävän oloinen ja liian ihmismäinen, kuitenkin olematta ihminen. Lisäksi yksi vastaajista totesi näkökentän ja kasvojentunnistuksen olevan rajoittunut liian pienelle alueelle. Parannusehdotuksina annettiin näkökentän laajentaminen, silmien liikuttaminen ennen pään liikkumista, katseen vaeltelu sekä yleisesti pään liikkeet.

3.3.3. *Robottiin tehdyt muutokset ensimmäisen testauksen pohjalta*

Yksi ilmeisimmistä testauksen aikana luoduista havainnoista on robotin elämättömyys, kun kasvojentunnistusjärjestelmä ei havaitse yhtään kasvoa. Tämä vähensi ohi kulkevien ihmisten kiinnostusta robotista sekä nosti kynnyksen robotin luokse kävelemiselle. Myös kyselyssä parannusehdotuksena toivottiin robotin katselevan aktiivisemmin ympärilleen.

Tämän takia robottiin lisättiin aktiivisempi valmiustila, jossa robotti kääntelee päätään sekä silmiään vaakatasossa satunnaisesti ikään kuin kasvoja etsiessään. Valmiustilaan siirryttyään robotti alkaa suorittamaan silmukkaa, jossa robotin päälle

sekä silmille annetaan satunnaiset mutta silti luonnollisissa rajoissa olevat vaakatason kääntymisarvot, joihin servot käännetään satunnaisesti valitun sekuntimäärän aikana. Tämän sekuntimäärän huomattiin olevan hyvä yhdestä neljään sekunnin alueella ihmismäisen liikkeen saavuttamiseksi.

Toinen testaamisessa ilmi tullut havainto liittyy tilanteeseen, jossa robotti havaitsee monta henkilöä, jotka ovat suunnilleen samalla etäisyydellä robotista. Tällöin robotti alkaa herkästi vaihtelevaan nopeasti näiden henkilöiden välillä, jolloin pää alkaa heilumaan puolelta toiselle yrittäessään päättää keneen katsoisi. Tämän ongelman hillitsemiseksi tehdyn muutoksen myötä robotti käyttää vain silmiään kasvojen seuraamiseen, kun kasvojentunnistusjärjestelmä havaitsee useammat kuin yhden kasvot.

Toista testikertaa varten robotin pää kiinnitettiin vielä hieman keskeneräiseen torsoon, joka koostui ylävartalon rungosta sekä olkavarsista. Torso lepäsi metallisen tuen päällä.

Kasvojentunnistukseen tai robotin mekaaniseen toteutukseen ei tehty testauskertojen välillä muutoksia, vaikka näissä havaittiinkin kehityskohteita testauksen aikana ja kyselyssä. Tämä siksi, että näiden piirteiden kehittämisen nähtiin sijoittuvan liiaksi alkuperäisen tavoitteen ulkopuolelle. Jatkokehityksen kannalta nämä seikat ovat kuitenkin merkittäviä, eikä niitä tulisi sivuuttaa.

3.3.4. Kyselyyn tehdyt muutokset ensimmäisen testauskerran pohjalta

Ensimmäisellä testauskerralla kysely havaittiin pääosin hyvin toimivaksi, mutta moni robottia lähestyneistä ihmisistä ei osannut suomea, eikä täten voinut vastata. Osa kyselyyn vastaajista ilmaisi suullisesti robotin tiettyjen ominaisuuksien, kuten älykkyyden tai mukavuuden, arvioimisen olevan haastavaa, sillä nähtävillä oli pelkkä robotin pää ja arviointi tuli tehdä sen liikkeiden ja ulkonäön perusteella. Samaa palautetta ei kuitenkaan esitetty itse kyselyssä, sillä yksikään vastaajista ei antanut kirjallisesti kehitysehdotuksia itse kyselyyn liittyen.

Potentiaalisten vastaajien määrän lisäämiseksi päätettiin kysely muuttaa englanninkieliseksi, jotta mahdollinen kielimuuri ei olisi esteenä halukkaiden vastaajien osallistumiselle. Lisäksi kysymykset 6.—8. päätettiin poistaa, sillä ne keskittyivät enemmän robotista välittyvään mielikuvaan ja vastaajan kokemuksen tuntemukseen, joiden arvioimisen oli nähty olevan haastavaa robotin ominaisuuksien ja kokoonpanon ollessa varsin keskeneräinen. Näin kysely myös keskittyi enemmän robotin liikkeisiin ja niiden laatuun ulkonäön sijasta.

Taulukko 6. Toinen kysely

Numero	Kysymys	Kategoria
1.	How lifelike were the robot's movements on a scale of 1—5?	Liike
2.	How humanlike were the robot's movements on a scale of 1—5?	Liike
3.	How elegant were the robot's movements on a scale of 1—5?	Liike
4.	How intentional were the robot's movements on a scale of 1—5?	Liike
5.	How well did the robot respond to its environment on a scale of 1—5?	Liike
6.	How much previous experience have you had with robots on a scale of 1—5?	Aiempi kokemus
7.	What did you like about the robot?	Vapaamuotoinen palaute
8.	What did you not like about the robot?	Vapaamuotoinen palaute
9.	How could the robot's movements be improved?	Vapaamuotoinen palaute
10.	How could the questionnaire be improved upon? Was there something in the questionnaire that worked well?	Palaute kyselystä

3.4. Toinen testauskerta

Toisella testauskerralla asettelu haluttiin pitää mahdollisimman lähellä ensimmäistä testauskertaa. Näin paikaksi valikoitui jälleen sama Oulun yliopiston aula, jossa robotti oli samassa sijainnissa. Robotin ohi kulki jälleen lukuisia ihmisiä, joilla oli mahdollisuus myös lähestyä robottia, ja robotin sekä ihmisten toimintaa seurattiin. Robottiin oli kiinnitetty lappu, jossa oli QR-koodi ja kehoitus vastata kyselyyn robotin kehittämiseksi. Päättä sivuille kallistavat lineaarimoottorit pidettiin toisellakin testauskerralla poissa käytöstä, sillä niiden toimintakuntoon saaminen olisi vaatinut ajallisesti liian suuren ponnistuksen.

Erona ensimmäiseen testikertaan oli se, että nyt robotille oli tulostettu torso ja olkavarret, joiden päälle pää oli kiinnitettynä (Kuva 6). Nopealla aikataululla toteutettu kiinnitys ei ollut kuitenkaan vielä viimeistelty, minkä vuoksi etenkin niskaa liikuttavien servojen kiinnitys oli epävaka. Myös pään eleitä kokeiltiin ajamalla niitä manuaalisesti komentoriviltä, mutta eleet eivät olleet vielä osana robotin automaattista toimintaa. Lisäksi kysely oli käännetty englannin kielelle mahdollisten vastaajien määrän kasvattamiseksi ja kyselystä oli poistettu kysymykset 6.—8. ensimmäisen kyselykerran havaintojen perusteella.



Kuva 6. Robotin kokoonpano toisella testauskerralla

3.4.1. Toisen testauskerran aikana esiin nousseet havainnot

Myös toisella testauskerralla havaittiin haasteita kasvojentunnistusohjelmaan liittyen. Testauksen aikana robotilla oli vaikeuksia tunnistaa kasvoja ihmisiltä, joilla oli silmälasit. Tämän tultua ilmi todettiin samankaltaisten ongelmien toistuvan myös pitkähiuksisilla ihmisillä, mikäli hiukset ovat kasvojen edessä.

Ensimmäisen testauskerran perusteella ongelmakohtaksi havaittu tilanne, jossa robotin näkökentässä on useita kasvoja, aiheutti edelleen haasteita. Nyt robotti oli ohjelmoitu vaihtelevaan katsettaan usean ihmisen välillä pelkillä silmillä sekä silmien että kasvojen kääntämisen sijaan, mutta silmissä oli nähtävissä selkeää nykimistä, viitaten ongelmaan ohjelmistossa. Todennäköisesti silmiä ohjaava solmu lähettää päällekkäisiä komentoja servolle, jolloin silmät pyrkivät ikään kuin katsomaan kaikkia kasvoja yhtäaikaaisesti, sen sijaan että vuorottelisi hallitusti kasvojen välillä.

Päälle ohjelmoituja kasvojen seuraamisesta riippumattomia eleitä, kuten nyökkäys ja pudistus, kokeiltiin manuaalisesti testauksen aikana. Ongelmaksi osoittautui, että kasvojentunnistukseen perustuvat pään liikkeet ja erikseen ajatut eleet toteutuivat päällekkäin, jolloin eleet jäivät usein kesken kasvojen seuraamisen liikkeiden mennessä etusijalle. Tämän seurauksena jonkinlainen tilan määrittäminen olisi tarpeen, jotta eleet ja kasvojen seuraaminen voivat vuorotella toiminnassaan.

Robotin torson sekä sitä kannattelevan tuen keskeneräisyys aiheuttivat pientä heilumista, etenkin kun robotti suorittaa suurempia pään liikkeitä. Torsossa olevat servojen kiinnikkeet sallivat myös servojen liikkumisen sekä päätä sivuille kallistavat servot lähtivät ajoittain irti kiinnikkeistään. Tämä aiheutti katkoksia testauksen aikana, sillä kiinnityksiä jouduttiin korjailemaan.

Osa katsojista ilmaisi ajatuksiaan robotista myös suullisesti kyselyyn vastaamisen sijasta. Suullisessa palautteessa esiin nousi ehdotukset siitä, että robotti liikuttaisi silmiään enemmän yksin, ilman pään yhdistymistä liikkeeseen. Lisäksi kameran sijaintia oikeassa silmässä kommentoitiin, ja ehdotettiin, että se sijoitettaisiin ulommas.

3.4.2. Kyselyn tulokset toisella testauksella

Toisella testauksella kysely oli käännetty englannin kielelle ja siitä oli poistettu robotista välittyviä ihmismäisiä ominaisuuksia ja vastaajan omia tuntemuksia mittaavat kysymykset 6.—8. Kyselyyn vastasi seitsemän osallistujaa, joista viisi antoi myös kirjallista palautetta yhteen tai useampaan kohtaan. Osallistujamäärä putosi siis jo valmiiksi alhaisesta ensimmäisen kyselykerran määrästä vielä viidellä, eikä kyselyn muuttaminen englanninkieliseksi näin ollen tuonut lisää vastaajia.

Koska toisesta kyselystä oli poistettu alkuperäisen kyselyn kysymykset 6.—8., olivat kyselyiden välillä yhteisesti numeerisesti arvioitavat kysymykset nyt 1.—5. Tulokset paranivat näistä jokaisen kysymyksen kohdalla verrattuna ensimmäiseen kyselykertaan (Taulukko 7) ja toisella testauksella viiden ensimmäisen kysymyksen keskiarvo oli 3,97 verrattuna ensimmäisen kyselyn vastaavaan keskiarvoon 3,48.

Perusjoukko oli kuitenkin hyvin pieni, joten muutos voi johtua esimerkiksi yksittäisten vastaajien eroista arvioinnin tulkitsemisessa, eikä välttämättä viittaa selkeisiin parannuksiin robotissa. Mainitsemisen arvoista on myös, että ensimmäisessä kyselyssä parhaan yksittäisen kysymyksen keskiarvon saanut liikkeiden tarkoituksellisuus sai jälleen parhaan keskiarvon, tosin tällä kertaa yhdessä robotin reagoimisen ympäristöönsä kanssa, ja huonoimman keskiarvon sai jälleen liikkeiden sulavuus, jolla ensimmäisellä kyselykerralla oli liikkeiden ihmismäisyyden kanssa huonoin keskiarvo.

Taulukko 7. Kysymysten keskiarvot kyselykertojen välillä

Kysymyksen numero	Keskiarvo ensimmäisessä kyselyssä	Keskiarvo toisessa kyselyssä
1.	3,33	4,00
2.	3,08	3,71
3.	3,08	3,57
4.	4,08	4,29
5.	3,8	4,29

Vastauksien vertailussa kyselykertojen välillä on myös otettava huomioon, että ensimmäisen ja toisen testikerran kyselyt olivat eri kielillä. Näin ollen kulttuuristen ja kielellisten erojen ja nuanssien vuoksi vastaajat ovat voineet ymmärtää kysymykset

ja kuvaavat adjektiivit vastauksetojen välillä eri tavoin, mikä edelleen voi vaikuttaa myös tuloksiin.

Kysymykseen osallistujien aikaisemmasta kokemuksesta robottien parissa kaksi vastaajista antoi arvosanan 3 ja viisi vastaajista arvosanan 2. Nyt arvosanan 2 antaneilla vastausten 1.—5. keskiarvo oli 3,76 ja arvosanan 3 antaneilla 4,25, eli enemmän robottien kanssa tekemisissä olleet arvioivat robottia pääsääntöisesti suopeammin. Perusjoukko on kuitenkin erittäin pieni, joten yksittäisetkin vastaukset vaikuttavat keskiarvoon suuresti — esimerkiksi yksi arvosanalla 3 aiemman kokemuksen arvioineista antoi kaikkiin muihin kysymyksiin arvosanaksi täyden 5. Aikaisemman kokemuksen keskiarvo laski ensimmäisestä kyselystä arvosta 2,75 arvoon 2,29, mutta toisaalta arvosanoja 1 ei tullut yhtään, joten kaikilla osallistujilla voidaan nähdä olleen jonkinasteista, vaikkakin mahdollisesti vähäistä, kokemusta roboteista.

Kirjallista palautetta pyydettiin samoilla kysymyksillä kuin ensimmäisellä testauskerralla. Kyselyyn osallistujat pitivät jälleen robotin silmistä, sillä kolme vastausta kehui niitä. Kaksi näistä vastaajista kertoi pitäneensä siitä, että silmät liikkuvat ennen päätä ja yksi vastaaja kertoi pitävänsä yleisesti silmien liikkeistä. Yksi näistä vastaajista myös piti siitä, kuinka robotti vaikutti havaitsevan ihmisiä hyvin silloinkin, kun he eivät olleet suoraan robotin edessä. Yksi vastaaja kehui myös robotin ihmismäisiä piirteitä.

Toisaalta robotin vähiten pidetty piirre oli juurikin sen ulkonäkö, sillä yksi vastaajista koki robotin näyttävän *karulta*, toinen vastaaja toivoi pään olevan suljetumpi ja kolmas vastaaja toivoi robotille pipoa päähän, mahdollisesti peittämään pään sisällä näkyvää laitteistoa. Lisäksi yksi vastaaja koki, että robotti voi olla vaarallinen. Robotin kehittämiseksi kaksi vastaajista ehdotti, että robotti voisi olla sulavampi, todennäköisesti viitaten joko liikkeisiin tai ulkonäön viimeistelyyn, ja yksi vastaaja ehdotti robotille parempaa kouluttamista, mahdollisesti viitaten kasvojentunnistuksen kouluttamiseksi paremmaksi koulutusmateriaalin avulla.

3.4.3. Robottiin tehdyt muutokset toisen testauskerran pohjalta

Toisen testauskerran jälkeen tehdyt muutokset ovat pääasiallisesti testaamisen aikana havainnoitujen virheellisten käytösten korjauksia.

Usean henkilön nähdessään robotti vaihteli liian nopeasti kasvojen välillä, johtaen nopeaan edestakaiseen silmien liikkeeseen. Tämän korjaukseksi silmien liikkeisiin lisättiin pieni tauko, kun robotti näkee useamman henkilön samaan aikaan. Käännettyään silmät kohti kasvoja robotti odottaa noin 0.7 sekuntia ennen uusien käskyjen lähettämistä.

Pään eleitä tehdessään robotti usein keskeytti eleen seuratakseen kasvoja. Tämän takia robotti nyt keskeyttää kasvojen seuraamisen eleen keston ajaksi. Eleitä toteuttava solmu lähettää kasvoja seuraavalle solmulle eleen keston ROS2 viestillä, minkä vastaanotettuaan kasvoja seuraava solmu keskeyttää toimintansa viestin määräämäksi ajaksi.

4. POHDINTA

Vaikkakin robotti pystyy kääntämään katseensa kohti tunnistettuja kasvoja kääntämällä sekä päätä että silmiä, liikkeissä on silti viivettä, ja pään ja silmien yhteistyö on puutteellista. Liikkeiden toteuttamisessa käytetty menetelmä painottaa liikaa tunnistetun kasvon sijaintia ja jättää pään ja silmien välisen koordinoinnin vähemmälle huomiolle. Kasvojen seurauksen laatua voidaan parantaa osittain laitteiston muutoksilla, mutta suurin parannuksen kohde on ohjelmistossa.

Leuka kykenee liikkumaan syötettyjen merkkijonojen mukaisesti, mutta merkkijonoa ei vielä saada puhesynteesiohjelmalta, eikä toimintaa ole varmistettu tällaisen ohjelman kanssa yhteistyössä, kuten tavoitteena oli. Näin ollen äänteitä kuvaaville merkeille ei ole voitu määrittää niiden kestoja. Myös avausasteiden määrittäminen leualle merkkien mukaan IPA:n luokittelujen perusteella on hyvin karkeaa arviointia, jossa eri äänteiden avausasteet on asetettu vain skaalalle mahdollisimman paljon auki olevasta täysin kiinni olevaan. Paremmiin ihmisen suuta mukailevat avausasteet voisi saavuttaa esimerkiksi kuvaamalla videomateriaalia suun liikkeistä ihmisten luonnollisesti puhuessa ja perustamalla arvot merkeille tämän mukaan.

Testikertojen päätarkoituksena oli saada selville puutteita sekä lisäkehityksen tarpeessa olevia osia robotin ohjelmistossa sekä laitteistossa. Vaikkakin numeerisella asteikolla olevat kysymykset antavat kuvaa robotin yleisistä, korkean tason ominaisuuksista kuten liikkeiden ihmismäisyydestä, niistä on vaikea johtaa tarkempia käytännön parannuksen kohteita. Kyselyyn vastanneella henkilöllä voi olla myös haastavaa antaa tarkkaa arvosanaa robotin ominaisuuksille, etenkin jos kyseinen henkilö ei voi verrata robottia mihinkään aikaisempaan kokemukseen, oli se sitten aikaisempi testikerta tai henkilön aiempi kokemus roboteista. Tämän takia kyselyssä olisi voinut enemmän painottaa vapaamuotoisia kirjallisia kysymyksiä, jotka antavat kyselyyn vastanneille henkilöille paremman mahdollisuuden jakaa havaintojaan robotin toiminnallisuudesta.

Numeerisella asteikolla olevien kysymysten rajat olivat myös hieman epäselviä. Esimerkiksi toisessa kysymyksessä, joka mittaa robotin liikkeiden ihmismäisyyttä, arvosana yksi tulkittiin todennäköisesti samalla tavalla, mutta arvosanan viisi merkitys saattoi vaihdella osallistujien välillä. Merkitseekö täydet pisteet täydellisiä, ihmisestä erottamattomia liikkeitä vai vain robotille erittäin hyviä liikkeitä? Lisäksi kahden kyselyn ollessa eri kielillä vaikuttaa tämä vastausten vertailukelpoisuuteen toisiinsa, joten kysely olisi ollut tehokkaampi toteutettuna yhdellä ainoalla kielellä.

Suun liikkeiden testaus rajoittui vain simulaattorilla ja fyysisellä robottipäällä tehtyihin toiminnallisuuden varmistuksiksi, jolloin ulkopuolisten mielipiteitä tai reaktioita liikkeisiin ja niiden toimintaan ei saatu. Vaikka puhesynteesiä ja sen ohjelmistoa ei robottiin testaushetkellä ollutkaan saatavilla, olisi suun liikkeitä voitu testata myös manuaalisesti. Testausilanteessa olisi esimerkiksi voitu syöttää puhetta kirjoitetussa muodossa robotin käyttöjärjestelmälle komentoriviltä ja yhtäaikaaisesti tekstin puheeksi muuttavaan ulkopuoliseen ohjelmaan. Näin robotti olisi ollut valmiimpi kokonaisuus ja suun liikkeissä mahdollisia myöhemmin esiintyviä haasteita olisi voitu jo tunnistaa. Suun liikkeille olisi kuitenkin täytynyt säätää ajoitukset ulkopuolisen puheohjelman mukaisiksi, mutta näitä ajoituksia ei todennäköisesti olisi voitu hyödyntää lopullisessa toteutuksessa.

Myöskään pään eleillä ulkopuolisten reaktioita ei testattu, sillä niiden toteutus valmistui vain hieman ennen toista testauskertaa, eikä testausta ehditty suunnitella. Testaaminen olisi ollut mahdollista esimerkiksi siten, että eleet olisi esitelty erikseen, irrallaan muusta vuorovaikutuksesta, ja kysytty ihmisten mielipiteitä kunkin eleen luonnollisuudesta. Mielekkäintä testaaminen olisi kuitenkin ollut valmiin puhesynteessin ja puheentunnistuksen kanssa, jolloin eleet oltaisiin voitu vain lisätä osaksi muuta kokonaisuutta. Robottia oltaisiin voitu esitellä erillisillä kerroilla eleiden kanssa ja ilman, minkä jälkeen oltaisiin vertailtu ihmisten reaktioita vuorovaikutukseen kokonaisuutena.

Ensimmäisellä testauskerralla robotti koostui vain päästä ja kaulasta, jolloin ensimmäisellä testauskerralla robotista välittyvien mielikuvien arvioiminen kyselyssä koettiin osin haastavaksi. Oletuksena toiselle testauskerralle oli, että kokoonpano pysyisi täysin samana, mutta robotille valmistuneet torso ja olkavarret haluttiin kiinnittää pään kanssa kokonaisuudeksi. Näin robotti oli ulkoisesti jo huomattavasti lähempänä ihmistä, mutta kyselyä oli jo mukautettu ensimmäisen testauskerran palautteen pohjalta, jolloin ihmismäisiä piirteitä ja subjektiivisia tuntemuksia mittaavat kysymykset oli ehditty jo poistaa. Tämä saattoi olla alunperinkin väärä päätös, mutta robotin muistuttaessa edelleen enemmän ihmistä, vaikutti päätös erityisen huonolta. Myös toisen kyselyn palautteessa toivottiin, että subjektiivisesta kokemuksesta olisi kysytty.

5. JATKOKEHITYS

Robotin kasvojentunnistusohjelmistossa on parannettavaa sekä toiminnallisuuden että suorituskyvyn osalta. Järjestelmän käyttämä SVM-luokittelija tunnistaa kasvoja hyvällä tarkkuudella sekä vakaasti hyvissä olosuhteissa, mutta kadottaa helposti kasvot, jos niitä peittävät esimerkiksi hiukset tai lasit. Kasvot eivät myöskään saa katsoa kovinkaan paljon sivuille kameran kuvakulmasta sekä etenkin poispäin katsovia kasvoja luokittelija ei kykene tunnistamaan ollenkaan. Tämä kuitenkin on ymmärrettävää, sillä luokittelija on tarkoitettu erityisesti kasvojen tunnistamiseen yleisesti päiden tunnistamisen sijasta. Tämän takia todennäköisesti tehokkain tapa kasvattaa järjestelmän suorituskykyä on vaihtaa luokittelumenetelmää kokonaisia kasvoja tunnistavasta hieman joustavampaan menetelmään. Yleisesti päitä tunnistava menetelmä mahdollistaisi anteeksiantavamman kasvojen tunnistuksen lisäksi poispäin sekä ohi kulkevien ihmisten paremman tunnistamisen. Kun robotti ei suoranaisesti kommunikoi kenenkään kanssa, robotti voisi seurata ohikulkijoita, yrittäen kiinnittää heidän huomionsa.

Koska päätökset kääntää silmiä ja päätä tehdään yksittäisten tunnistusten pohjalta, järjestelmä ei kykene mukauttamaan liikkeitään riittävästi nopeasti liikkuvan henkilön seuraamiseksi. Jos kasvojentunnistusjärjestelmä tunnistaisi kasvojen sijainnin lisäksi niiden vauhdin sekä liikkeen suunnan, robotti voisi ennakoida kasvojen tulevan sijainnin ja tämän avulla seurata liikkuvia henkilöitä paremmin. Nopeammin reagoivan sekä sulavamman seuraamisen saavuttamiseksi robotin servojen pitäisi myös pystyä muuttamaan nopeuttaan sekä suuntaansa ilman hetkellistä pysähtymistä.

Testaamisen aikana robotin luokse tulleet henkilöt usein yrittivät kiinnittää sen huomion esimerkiksi heiluttamalla kättään sen näkökentän reunalta. Tämän kaltaisen elehtimisen tunnistaminen voisi helpottaa keskustelun aloittamista robotin kanssa. Tässä kuitenkin pitää huomioida robotin senhetkinen tila, ettei se vaihda huomion kohdettaan kesken keskustelun.

Vaikkakin kasvojentunnistusjärjestelmän suunnittelussa on tärkeä pitää järjestelmän laskennallinen monimutkaisuus alhaisena, todennäköisesti suurin vaikutus tämänhetkisen järjestelmän suorituskykyyn on kuitenkin itse suoritusympäristöllä. Järjestelmä olisi oleellista siirtää virtuaalikoneen emuloidusta ympäristöstä fyysiseen ympäristöön. Tällöin kasvojentunnistuksessa sekä mahdollisesti muissakin robotin järjestelmissä voidaan fyysisen prosessorin suoran yhteyden lisäksi hyödyntää paremmin laitteen näytönohjaimia, jotka ovat huomattavasti parempia tekoälysovellusten suorittamisessa tavalliseen prosessoriin verrattuna.

Myös robotin laitteistossa on parannettavaa. Tämänhetkinen silmään upotettu kamera kuvaa videota vain 1280 x 800 pikselin tarkkuudella, minkä takia kauempana olevissa kasvoissa ei ole tarpeeksi yksityiskohtia kasvojentunnistusjärjestelmän tunnistettavaksi. Kameran päivittäminen korkeampaan tarkkuuteen mahdollistaisi kasvojen tunnistusetäisyyden kasvattamisen huomattavan suorituskyvyn hinnalla. Kameraa voisi myös siirtää lähemmäs silmän etuosaa, jotta kuvassa 4 näkyvät mustat reunat saataisiin pois tieltä.

Päätä kallistavien lineaarimoottorien toiminnallisuutta olisi tärkeä parantaa. Nykyisen muotoilun takia moottoreilla on vaikeuksia kallistaa päätä eteen ja taakse mutta etenkin sivuille kallistamisen toimivuus on lähes olematonta. Sivuille kallistavia moottoreita täytyy liikuttaa erittäin synkronisesti, jotta ne eivät jumittuisi, minkä takia

ne otettiin pois käytöstä testaamisen aikana. Koska lineaarimoottorien ruuviosat ovat kiinteästi kiinni servomoottoreissa, servot eivät myöskään saa kallistua ollenkaan. Tämän voisi mahdollisesti ratkaista kiinnittämällä ruuviosa servoihin pallonivelellä, joka sallisi kallistamisen mutta silti välittäisi servon pyörimisliikkeen ruuville.

Koska robotin pään servomoottorit ovat sarjaan kytkettyjä, yhden johdon irtoaminen tai katkeaminen johtaa johdon paikasta riippuen jopa kaikkien moottorien toimimattomuuteen. Tämän takia moottorien kytkennät olisi hyvä miettiä uudelleen laitteiston luotettavuuden parantamiseksi. Etenkin silmien ja suun pienemmät XL-320 -servomoottorit olisi hyvä erottaa suuremmista pään XL-430 -servomoottoreista, koska juuri mainitun syyn lisäksi moottorien virtavaatimuksissa on pieniä eroja.

Suun liikkeet toimivat itsenäisenä ominaisuutenaan, mutta niiden yhdistäminen puhesynteesiin jäi toteuttamatta, sillä puhesynteesin ohjelmistoa ei ollut kehitetty valmiiksi. Leukaa liikuttava ohjelmisto pyrittiin luomaan mahdollisimman hyvin lopullista toteutusta vastaavaksi, ja puhesynteesin solmun yhdistäminen leuan niveltä liikuttavaan solmuun alustamaan mahdollisimman pitkälle, jotta toimintojen yhteensovittaminen tapahtuisi mahdollisimman vaivattomasti. Suurimmaksi haasteeksi jää todennäköisesti ajoitusten säätäminen leuan liikkeille puhesynteesin ajoitusten mukaan.

Merkkijonon suun avausasteiksi muuttava funktio on nykyisellä toteutuksellaan varsin pelkistetty ja yksinkertainen, joten äänneiden muuttumista erityistapauksissa tavallisista poikkeaviksi, jolloin myös suun asento voi vaihdella, ei ole otettu huomioon. Tämä vaatisi joko huomattavasti monimutkaisemman funktion tunnistamaan tällaisia tapauksia tai laajan kirjaston poikkeustapauksista, joihin merkkijonoja verrataan. Suun nykyisen rakenteen vuoksi puhetta imitoivat liikkeet ovat kuitenkin varsin minimaalisia, eivätkä voi tarkasti imitoida ihmisen liikkeitä. Onkin siis tarpeellista arvioida erittäin tarkkojen arvojen ja kaikkien erityistapausten tunnistamisen mielekkyyttä jatkokehityksessä.

6. AJANKÄYTTÖ

Taulukko 8. Ajankäytön seuranta

Toteutusviikko	Tekijä		
	Kari-Pekka Ahola	Markus Komulainen	Ville Nättinen
1	8	8	6
2	3	1	0
3	10	10	11
4	8	10	8
5	8	8	13
6	3	4	3
7	1	2	2
8	6	6	4
9	6	5	2
10	2	5	11
11	4	15	5
12	7	10	11
13	2	8	7
14	14	10	7
15	8	13	14
16	8	1	4
17	3	1	1
18	2	3	7
19	2	5	2
20	7	8	9
21	4	4	5
Yhteensä	116	137	132

7. YHTEENVETO

Testauskertojen pohjalta tehtyjen muutoksien jälkeen robotin pää pystyy seuraamaan lähellä olevia kasvoja, suorittamaan päällään erilaisia eleitä ihmisen ja robotin vuorovaikutuksen parantamiseksi sekä päällä on valmius yhdistää syntetisoitu puhe leuan liikkeisiin. Kasvojen seuraamisessa robotti hyödyntää pään kääntymistä, kun seurattava kasvo siirtyy silmien ulottumattomiin sekä etsii aktiivisesti uusia kasvoja, kun robotti ei ole hetkeen nähnyt niitä. Pään eleet ovat toteutettu helppokäyttöisinä funktioina, joita on helppo kutsua solmun sisältä tai sen ulkopuolelta käyttämällä ROS2:n viestijärjestelmää. Myös uusien eleiden lisäämistä on helpotettu toteutetuilla apufunktioilla. Leuan synkronoisissa puheeseen robotti muuttaa annetun merkkijonon merkki kerrallaan leukaa liikuttavalle servomoottorille avausarvoiksi. Merkkijonon saaminen voidaan toteuttaa, kun puhesynteesiohjelma on luotu osaksi ohjelmistoa.

8. VIITTEET

- [1] Mickle P. (1961) A peep into the automated future. The capital century 1900–1999. <http://www.capitalcentury.com/1961.html> .
- [2] Zamalloa I., Kojcev R., Hernández A., Muguruza I., Usategui L., Bilbao A. & Mayoral V. (2017), Dissecting robotics - historical overview and future perspectives. URL: <https://arxiv.org/abs/1704.08617>.
- [3] (2023), Lego mindstorms - tuotesivu. URL: <https://www.lego.com/fi-fi/themes/mindstorms/about>.
- [4] Mori M., MacDorman K.F. & Kageki N. (2012) The uncanny valley [from the field]. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19, ss. 98–100.
- [5] Strathearn C. & Ma E.M. (2021) A novel speech to mouth articulation system for realistic humanoid robots. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications* 101, ss. 1–17. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10846-021-01332-2>.
- [6] Admoni H. & Scassellati B. (2017) Social eye gaze in human-robot interaction: A review. *J. Hum.-Robot Interact.* 6, s. 25–63. URL: <https://doi.org/10.5898/JHRI.6.1.Admoni>.
- [7] Oh K.G., Jung C.Y., Lee Y.G. & Kim S.J. (2010) Real-time lip synchronization between text-to-speech (tts) system and robot mouth. *Teoksessa: 19th International Symposium in Robot and Human Interactive Communication*, ss. 620–625.
- [8] Lütkebohle I., Hegel F., Schulz S., Hackel M., Wrede B., Wachsmuth S. & Sagerer G. (2010) The bielefeld anthropomorphic robot head “flobi”. *Teoksessa: 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, ss. 3384–3391.
- [9] Kätsyri J., Förger K., Mäkäräinen M. & Takala T. (2015) A review of empirical evidence on different uncanny valley hypotheses: support for perceptual mismatch as one road to the valley of eeriness. *Frontiers in Psychology* 6. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2015.00390>.
- [10] Gray K. & Wegner D.M. (2012) Feeling robots and human zombies: Mind perception and the uncanny valley. *Cognition* 125, ss. 125–130. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010027712001278>.
- [11] Appel M., Izydorczyk D., Weber S., Mara M. & Lischetzke T. (2020) The uncanny of mind in a machine: Humanoid robots as tools, agents, and experiencers. *Computers in Human Behavior* 102, ss. 274–286. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0747563219302742>.

- [12] Rosenthal-von der Pütten A.M. & Krämer N.C. (2014) How design characteristics of robots determine evaluation and uncanny valley related responses. *Computers in Human Behavior* 36, ss. 422–439. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0747563214001940>.
- [13] Cheetham M., Suter P. & Jäncke L. (2011) The human likeness dimension of the “uncanny valley hypothesis”: Behavioral and functional mri findings. *Frontiers in Human Neuroscience* 5. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2011.00126>.
- [14] Bartneck C., Kulić D., Croft E. & Zoghbi S. (2009) Measurement instruments for the anthropomorphism, animacy, likeability, perceived intelligence, and perceived safety of robots. *International Journal of Social Robotics* 1, ss. 71–81. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12369-008-0001-3>.
- [15] MacDorman K.F. & Ishiguro H. (2006) The uncanny advantage of using androids in cognitive and social science research. *Interaction Studies* 7, ss. 297–337. URL: <https://www.jbe-platform.com/content/journals/10.1075/is.7.3.03mac>.
- [16] Sidner C.L., Lee C., Kidd C.D., Lesh N. & Rich C. (2005) Explorations in engagement for humans and robots. *Artificial Intelligence* 166, ss. 140–164.
- [17] Wang E., Lignos C., Vatsal A. & Scassellati B. (2006) Effects of head movement on perceptions of humanoid robot behavior. Teoksessa: Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART Conference on Human-Robot Interaction, HRI '06, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, s. 180–185. URL: <https://doi.org/10.1145/1121241.1121273>.
- [18] Ghiglini D., Willemse C., Tommaso D.D., Bossi F. & Wykowska A. (2020) At first sight: robots’ subtle eye movement parameters affect human attentional engagement, spontaneous attunement and perceived human-likeness. *Paladyn, Journal of Behavioral Robotics* 11, ss. 31–39. URL: <https://doi.org/10.1515/pjbr-2020-0004>.
- [19] Cheetham M., Pavlovic I., Jordan N., Suter P. & Jancke L. (2013) Category processing and the human likeness dimension of the uncanny valley hypothesis: Eye-tracking data. *Frontiers in Psychology* 4. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2013.00108>.
- [20] Sabanovic S., Michalowski M. & Simmons R. (2006) Robots in the wild: observing human-robot social interaction outside the lab. Teoksessa: 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2006., ss. 596–601.
- [21] Gockley R., Bruce A., Forlizzi J., Michalowski M., Mundell A., Rosenthal S., Sellner B., Simmons R., Snipes K., Schultz A. & Wang J. (2005) Designing robots for long-term social interaction. Teoksessa: 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, ss. 1338–1343.

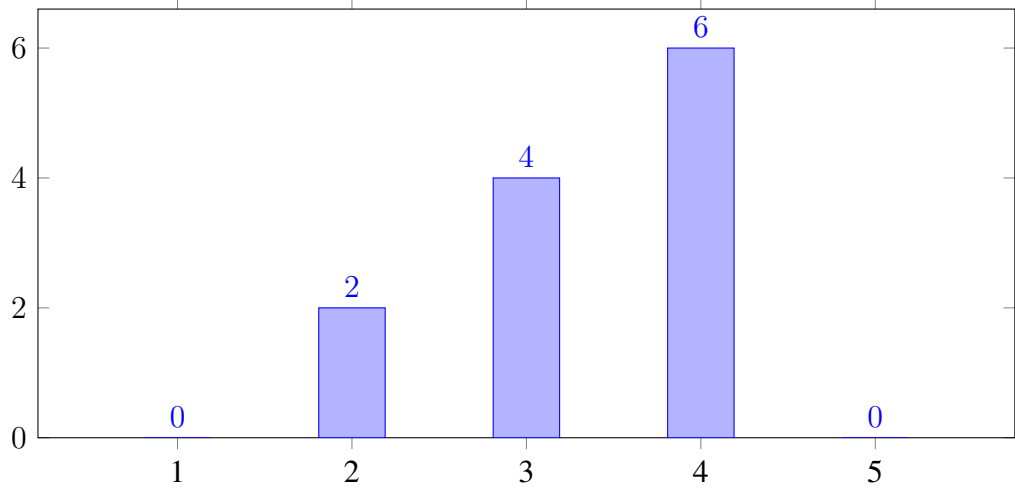
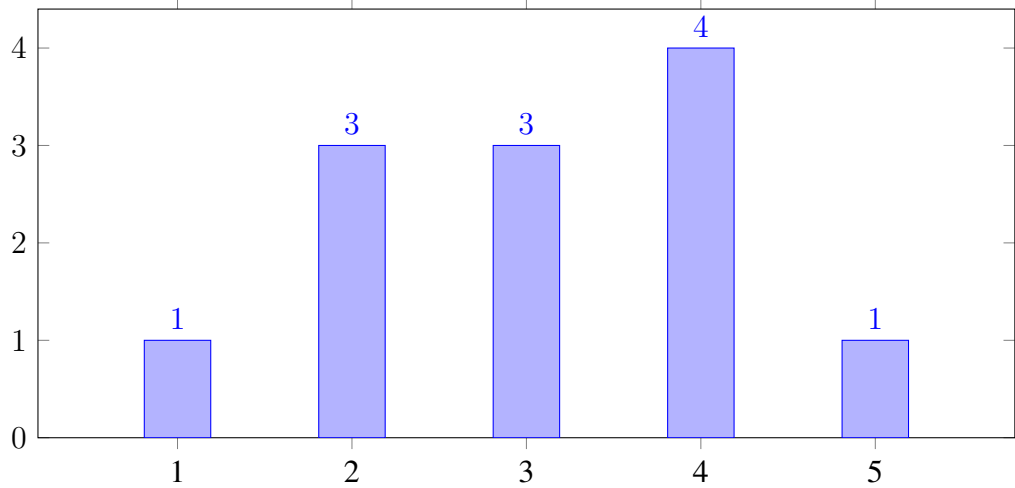
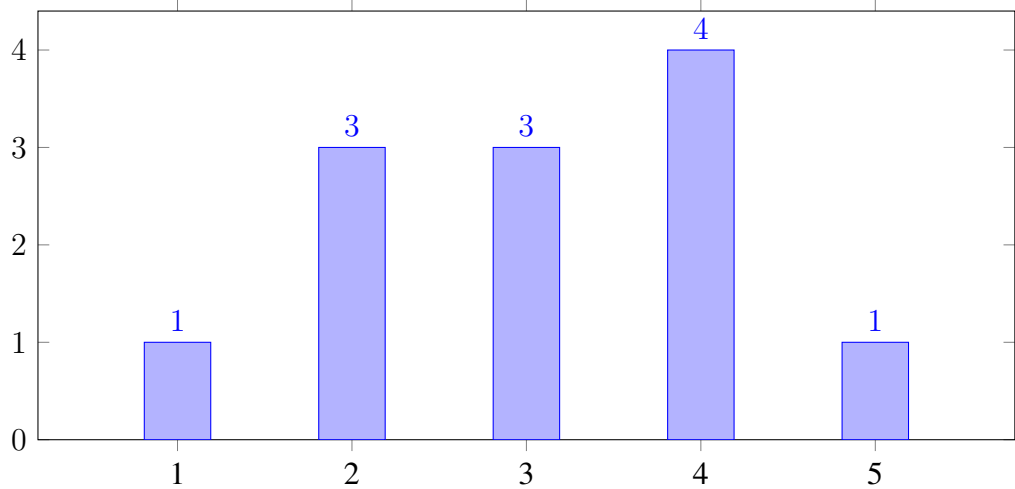
- [22] Bruce A., Nourbakhsh I. & Simmons R. (2002) The role of expressiveness and attention in human-robot interaction. Teoksessa: Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292), nide 4, nide 4, ss. 4138–4142 vol.4.
- [23] Chien S.E., Chu L., Lee H.H., Yang C.C., Lin F.H., Yang P.L., Wang T.M. & Yeh S.L. (2019) Age difference in perceived ease of use, curiosity, and implicit negative attitude toward robots. *J. Hum.-Robot Interact.* 8. URL: <https://doi.org/10.1145/3311788>.
- [24] Leigh R.J. & Zee D.S. (1999) *The neurology of eye movements*. Oxford University Press, 3 p.
- [25] Young L.R. & Sheena D. (1975) Survey of eye movement recording methods. *Behavior Research Methods & Instrumentation* 7, ss. 397–429.
- [26] Proudlock F.A. & Gottlob I. (2007) Physiology and pathology of eye–head coordination. *Progress in Retinal and Eye Research* 26, s. 486–515.
- [27] Pozzo T., Berthoz A. & Lefort L. (1989) Head kinematic during various motor tasks in humans. *Progress in Brain Research* 80, ss. 377–83.
- [28] Wiik Kalevi .. (1998) *Fonetiikan perusteet*. WSOY, Porvoo ; Helsinki ; Juva, 2. uud. p. p.
- [29] Barker S., Izadi H., Crook N.T., Hayatleh K., Rolf M., Hughes P. & Fellows N. (2017) Natural head movement for hri with a muscular-skeletal head and neck robot. Teoksessa: 2017 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), ss. 587–592.
- [30] Zhang J., Sheng J., O’Neill C.T., Walsh C.J., Wood R.J., Ryu J.H., Desai J.P. & Yip M.C. (2019) Robotic artificial muscles: Current progress and future perspectives. *IEEE Transactions on Robotics* 35, ss. 761–781.
- [31] Higuera-Ruiz D.R., Nishikawa K., Feigenbaum H. & Shafer M. (2021) What is an artificial muscle? a comparison of soft actuators to biological muscles. *Bioinspiration & Biomimetics* 17, s. 011001. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1748-3190/ac3adf>.
- [32] Saygin A.P., Chaminade T., Ishiguro H., Driver J. & Frith C. (2011) The thing that should not be: predictive coding and the uncanny valley in perceiving human and humanoid robot actions. *Social Cognitive and Affective Neuroscience* 7, ss. 413–422. URL: <https://doi.org/10.1093/scan/nsr025>.
- [33] Pandey A.K. & Gelin R. (2018) A mass-produced sociable humanoid robot: Pepper: the first machine of its kind. *IEEE Robotics and Automation Magazine* 25, ss. 40–48.
- [34] (2022), *Robothespian*. URL: <https://www.engineeredarts.co.uk/robot/robothespian/>.

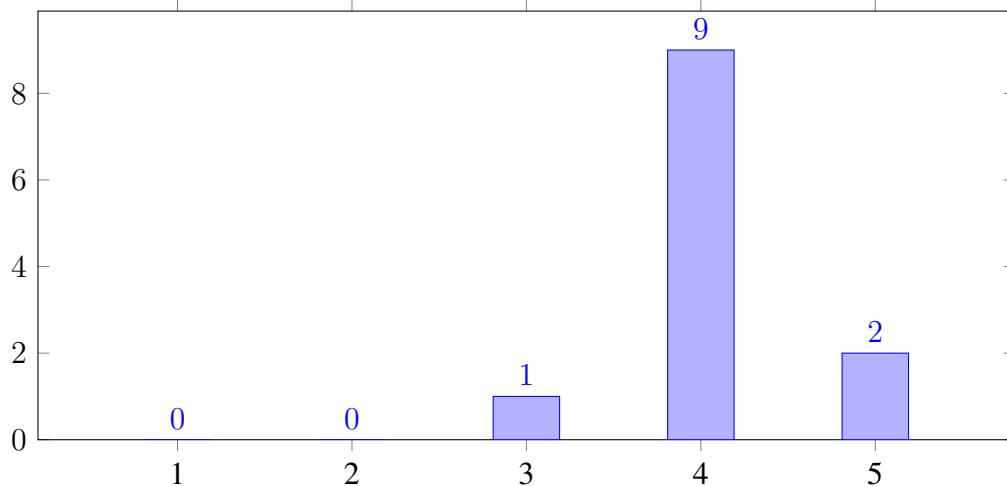
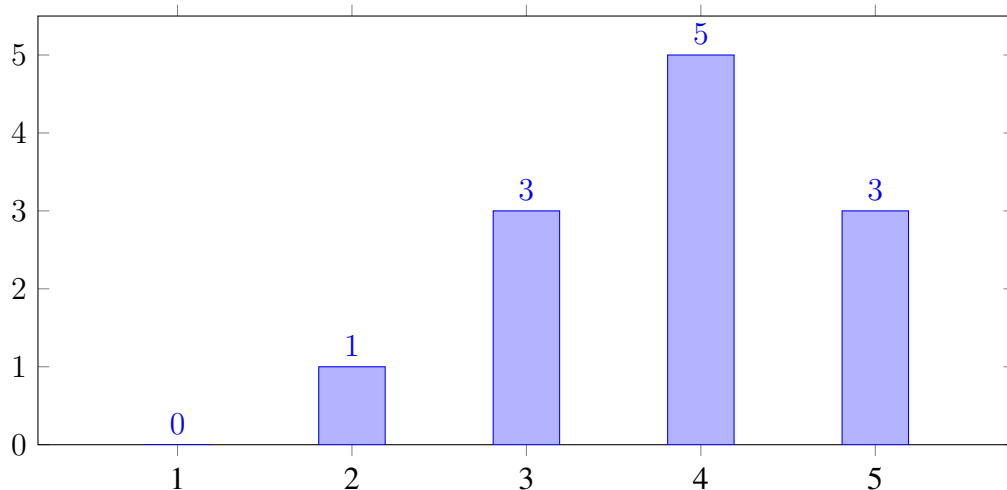
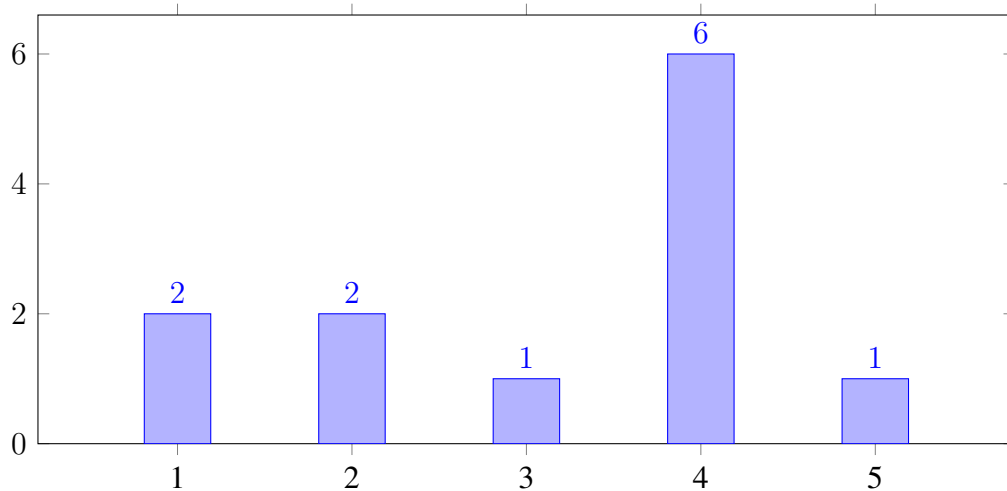
- [35] Onuki T., Ida K., Ezure T., Ishinoda T., Sano K., Kobayashi Y. & Kuno Y. (2014) Designing robot eyes and head and their motions for gaze communication. Teoksessa: D.S. Huang, V. Bevilacqua & P. Premaratne (toim.) Intelligent Computing Theory, Springer International Publishing, Cham, ss. 607–618.
- [36] Beira R., Lopes M.C., Praça M., Santos-Victor J., Bernardino A., Metta G., Becchi F. & Saltarén R.J. (2006) Design of the robot-cub (icub) head. Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. , ss. 94–100.
- [37] Viola P. & Jones M. (2001) Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. Teoksessa: Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001, nide 1, nide 1, ss. I–I.
- [38] OpenCV (2023), Opencv. URL: <https://opencv.org/>.
- [39] Dalal N. & Triggs B. (2005) Histograms of oriented gradients for human detection. Teoksessa: 2005 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (CVPR'05), nide 1, Ieee, nide 1, ss. 886–893.
- [40] King D. (2022), Dlib. URL: <http://dlib.net/>.
- [41] Alom M.Z., Taha T.M., Yakopcic C., Westberg S., Sidike P., Nasrin M.S., Hasan M., Van Essen B.C., Awwal A.A. & Asari V.K. (2019) A state-of-the-art survey on deep learning theory and architectures. electronics 8, s. 292.
- [42] Mavilla Vari Palli A.J. & Medimi V.S. (2022), A comparative study of yolo and haar cascade algorithm for helmet and license plate detection of motorcycles.
- [43] Sun X., Wu P. & Hoi S.C. (2018) Face detection using deep learning: An improved faster rcnn approach. Neurocomputing 299, ss. 42–50. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231218303229>.
- [44] Putro M.D. & Jo K.H. (2018) Real-time face tracking for human-robot interaction. Teoksessa: 2018 International Conference on Information and Communication Technology Robotics (ICT-ROBOT), ss. 1–4.
- [45] Gu L. & Su J. (2006) Gaze control on humanoid robot head. Teoksessa: 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, nide 2, nide 2, ss. 9144–9148.
- [46] Kuang X., Gibson M., Shi B.E. & Rucci M. (2012) Active vision during coordinated head/eye movements in a humanoid robot. IEEE Transactions on Robotics 28, ss. 1423–1430.
- [47] Kshirsagar A., Lim M., Christian S. & Hoffman G. (2020) Robot gaze behaviors in human-to-robot handovers. IEEE Robotics and Automation Letters 5, ss. 6552–6558.

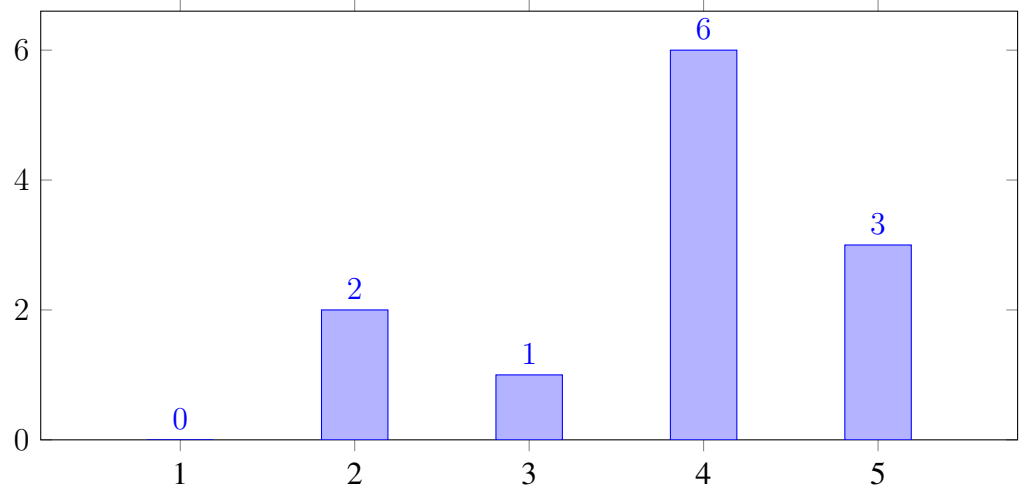
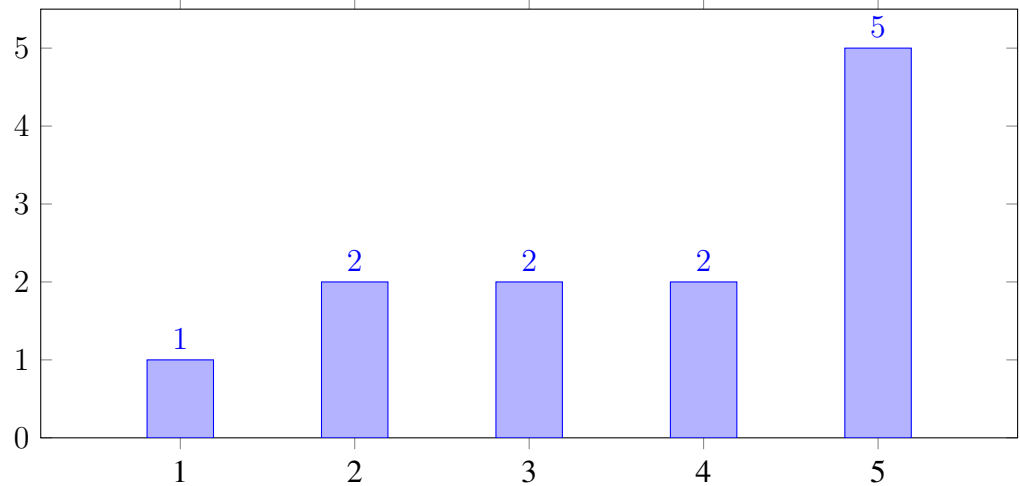
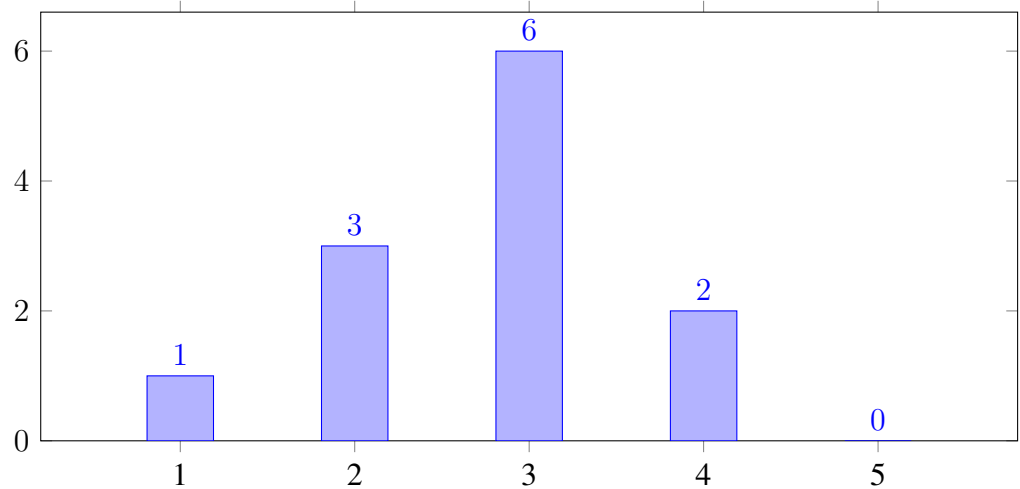
- [48] Alim S.A. & Rashid N.K.A. (2018) Some commonly used speech feature extraction algorithms. IntechOpen London, UK:.
- [49] Strathearn C. (2020), Appendix: 12. robotic mouth system demonstration video. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=iwrRm9Xywas>.
- [50] Strathearn C. (2019), Euclid: A humanoid robot developed by carl strathearn. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=DA9i0z-1sR4>.
- [51] Langevin G. (2023), Inmoov home site. URL: <https://inmoov.fr/>.
- [52] Microsoft (2023), Microsoft lifecam hd-3000 tuotesivu. URL: <https://www.microsoft.com/en/accessories/products/webcams/lifecam-hd-3000?activetab=pivot:overviewtab>.
- [53] Macenski S., Foote T., Gerkey B., Lalancette C. & Woodall W. (2022) Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild. Science Robotics 7, s. eabm6074. URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/scirobotics.abm6074>.
- [54] Kulju K., Zouaghi U. & Rytönen J. (2022) Implementing human-like eye movements for social robot. University of Oulu, Faculty of information technology and electrical engineering.

9. LIITTEET

Liite 1	Ensimmäisen testauskerran kyselyn tulokset
Liite 2	Toisen testauskerran kyselyn tulokset

1. Kuinka luonnolliseksi koit robotin liikkeitä asteikolla 1–5?**2. Kuinka ihmismäiseksi koit robotin liikkeitä asteikolla 1–5?****3. Kuinka sulaviksi koit robotin liikkeitä asteikolla 1–5?**

4. Kuinka tarkoitukselliseksi koit robotin liikkeet asteikolla 1–5?**5. Kuinka hyvin koit robotin reagoivan ympäristöönsä asteikolla 1–5?****6. Kuinka älykkääksi koit robotin asteikolla 1–5?**

7. Kuinka miellyttäväksi koit robotin asteikolla 1–5?**8. Kuinka rauhalliseksi koit olosi robotin seurassa asteikolla 1–5?****9. Kuinka paljon olet aikaisemmin ollut robottien kanssa tekemisissä asteikolla 1–5?**

10. Mistä pidit robotissa?

Kaksi vastausta kehui silmiä, tarkentamatta enempää. Robottia kehuittiin hienoksi, ei-pelottavaksi, sen ulkomuotoa sanottiin yleisesti hyväksi ja hauskaksi ja projektin kerrottiin vaikuttavan mielenkiintoiselta.

11. Mistä et pitänyt robotissa?

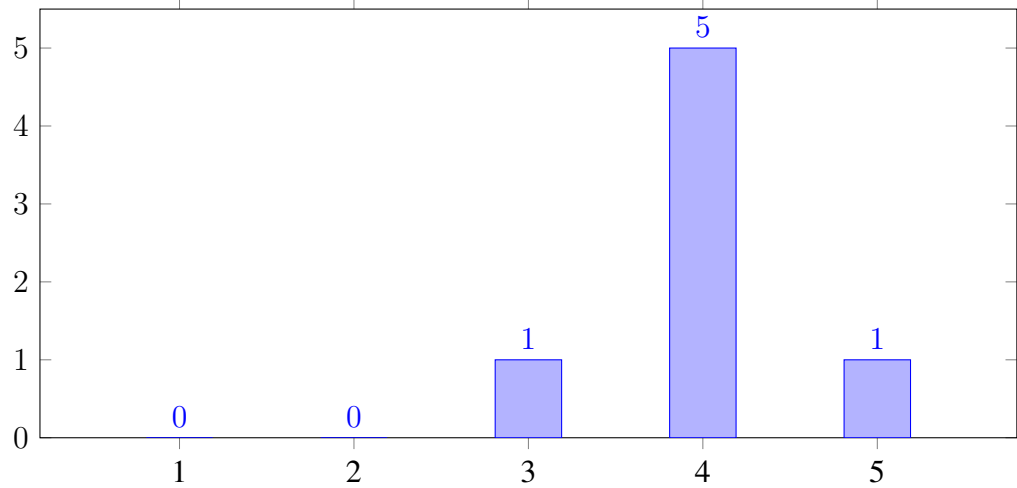
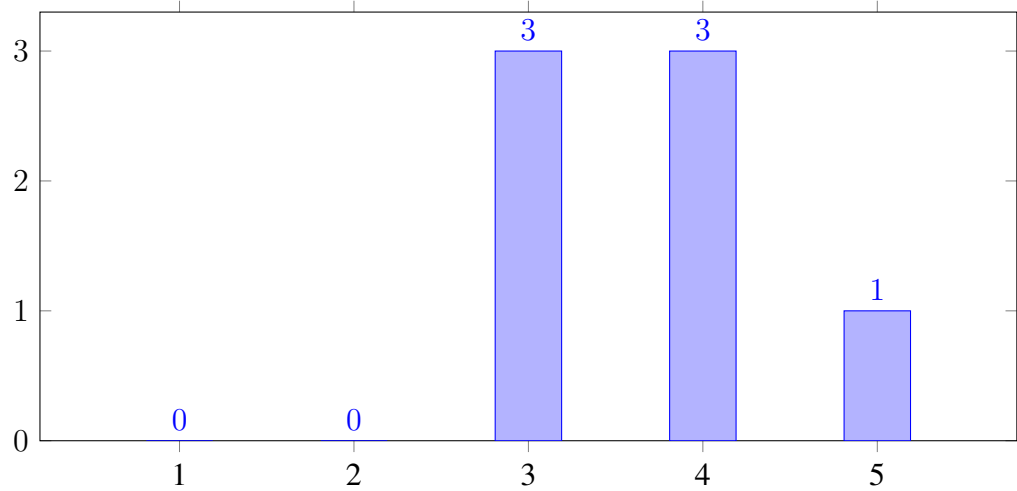
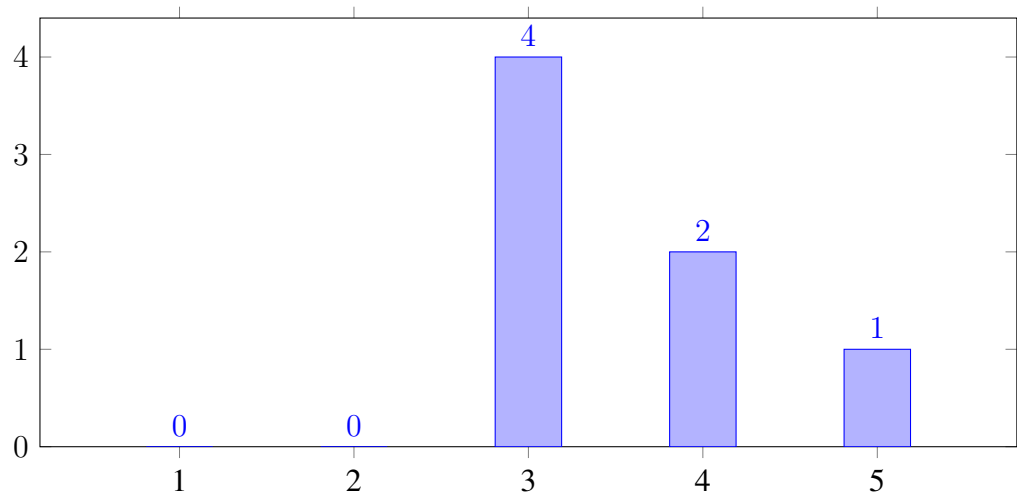
Kaksi vastausta sanoi robotin olevan luotaantyöntävän oloinen. Robottia sanottiin liian ihmismäiseksi. Sen näkökenttää kuvailtiin liian lyhyeksi ja rajatuksi. Kasvojentunnistuksessa nähtiin parantamisen varaa. Liikkeitä kuvailtiin jäykähköinä.

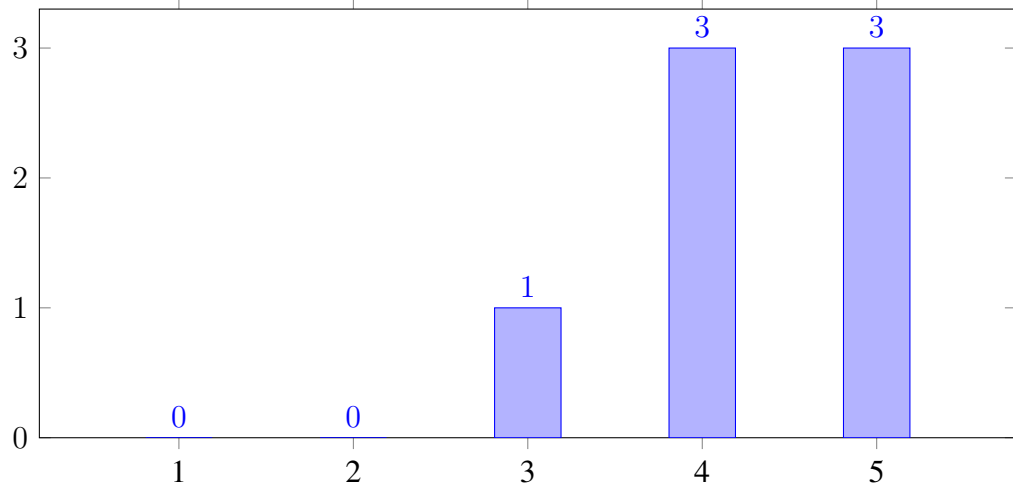
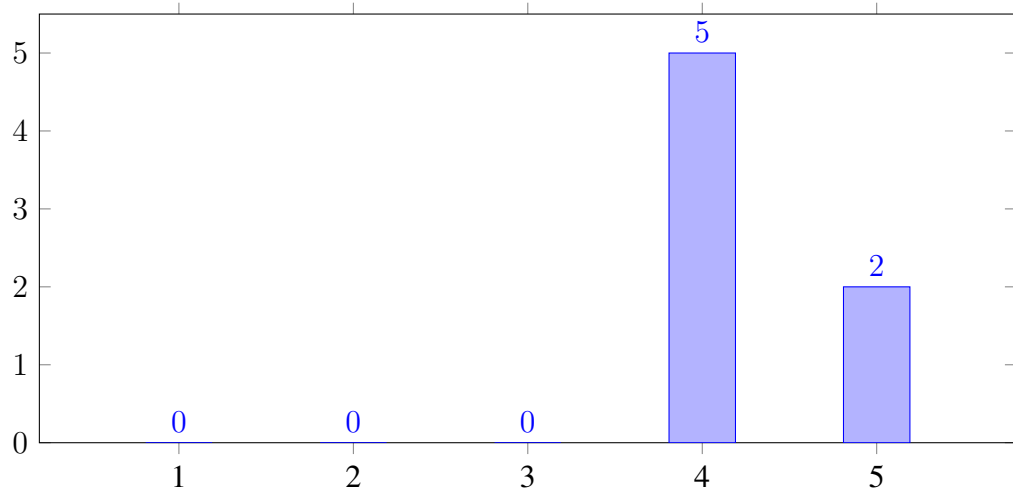
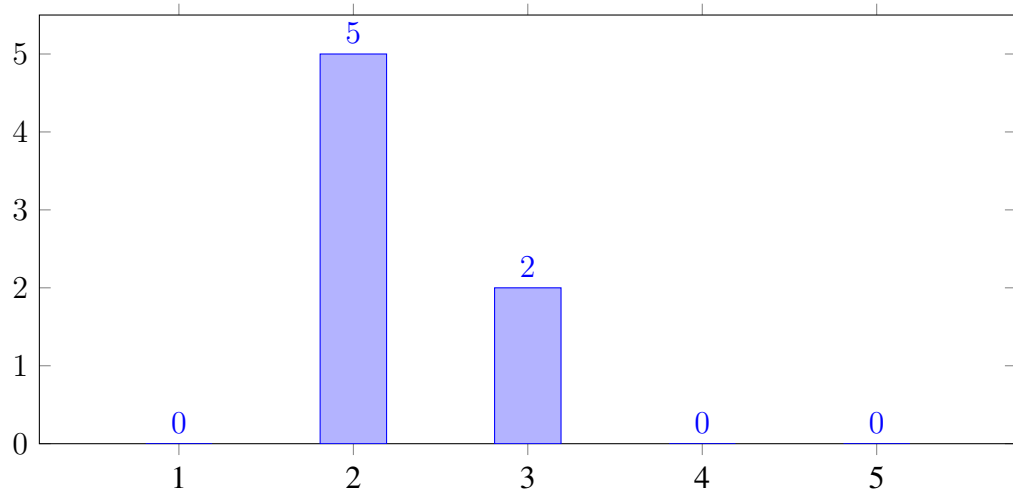
12. Miten robotin liikkeitä voisi mielestäsi parantaa?

Robotin liikkeiden parantamiseksi ehdotettiin silmien liikuttamista ennen pään liikuttamista, pään liikkeiden parantamista yleisesti, näkökentän laajentamista sekä katselua ympärille enemmän. Hyvinä ominaisuuksina mainittiin silmät yleisesti ja koko pään liikkuminen katseen mukana.

Miten tätä kyselyä voisi mielestäsi parantaa? Oliko kyselyssä jotain, joka toimi mielestäsi hyvin?

Parannusehdotuksia kyselyyn ei tullut. Kyselyssä kerrottiin olevan tärkeitä asioita robotin arvioimiseksi ja kyselyn kerrottiin vaikuttavan mielenkiintoiselta ja hyvin järjestetyltä.

1. How lifelike were the robot's movements on a scale of 1-5?**2. How humanlike were the robot's movements on a scale of 1-5?****3. How elegant were the robot's movements on a scale of 1-5?**

4. How intentional were the robot's movements on a scale of 1–5?**5. How well did the robot respond to its environment on a scale of 1–5?****6. How much previous experience have you had with robots on a scale of 1–5?**

7. What did you like about the robot?

Kaksi vastaajaa piti siitä, että silmät liikkuvat ennen muuta päätä, silmien liikettä keuhuttiin yleisesti, ihmismäisistä silmistä ja yleisesti ihmismäisistä piirteistä pidettiin ja robotin kerrottiin vaikuttavan reagoivan hyvin sivuillakin oleviin ihmisiin.

8. What did you not like about the robot?

Ulkomuodon kerrottiin olevan karu, robotin kerrottiin vaikuttavan mahdollisesti vaaralliselta, robotin pään nähtiin voivan olla suljetumpi sekä robotilta koettiin uupuvan pipo päästä.

9. How could the robot's movements be improved?

Kaksi vastaaja toivoi robotin olevan sulavampi ja robotin kouluttamisessa nähtiin kehitettävää.

10. How could the questionnaire be improved upon? Was there something in the questionnaire that worked well?

Ainoana parannusehdotuksena toivottiin kyselyssä kerättävän palautetta myös osallistujien subjektiivisesta kokemuksesta, kuten miten robotin seuraava katse vaikuttaa osallistujan tunnetilaan.